انتشـــــار الأمـــواج الكهرطيسية والهوائيات


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

انتشار الأمواج الكهرطيسية والهوائيات

الدكتور
عبد الوهاب الترجمان
الأستاذ في قسم
الالكترونيات والاتصالات

الدكتور
فريز عبود
الأستاذ في قسم
الالكترونيات والاتصالات

الدكتور
شحادة موسى
الأستاذ المساعد في قسم
الالكترونيات والاتصالات

جامعة دمشق

١٤٣١ - ١٤٣٢ هـ
٢٠١٠ - ٢٠١١ م

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفهرس

	رقم الصفحة
مقدمـــــة	٩
الجـــــــــــزء الأول	
انتشار الأمواج الكهرطيسية	١١
الفصل الأول : مواضيع عامة في انتشار الأمواج الكهرطيسية	١٣
١-١ مقدمة	١٥
١-٢ حساب شدة الحقل على بعد r من مشع نظري نقطي	١٨
١-٣ انتشار الأمواج الكهرطيسية المستوية في وسط عازل كهربائي مثالي متجانس	٢١
١-٤ انتشار الأمواج الكهرطيسية المستوية في وسط نصف ناقل متجانس	٣١
١-٥ استقطاب الأمواج الكهرطيسية	٤٢
١-٦ انعكاس الأمواج الكهرطيسية على سطح الأرض	٤٩
١-٧ توليد إشعاع ثانوي بواسطة جسم معدني ذي شكل ما	٧٠
١-٨ نظرية التبديل	٧٩
١-٩ انتشار الأمواج الكهرطيسية حول الكرة الأرضية	٨٠
الفصل الثاني : انتشار الأمواج الأرضية	٨٧
٢-١ الصفات الكهربائية للأرض	٨٩
٢-٢ طريقة دراسة انتشار الأمواج الأرضية	٩١
٢-٣ انتشار الأمواج المستوية على سطح أرض مستو نصف ناقل	٩٣
٢-٤ انتشار أمواج كهرطيسية تشع فوق سطح أرض مستو نصف ناقل من هوائي موجود فوق سطح الأرض مباشرة	١٠٥
٢-٥ انتشار الأمواج الأرضية على أراضي مختلفة النوع	١١٢
٢-٦ انتشار الأمواج الأرضية التي تشع من هوائي موجود على سطح أرض كروي نصف ناقل على سطح الأرض	١٢٠

الفصل الثالث : الجو المتأين ١٢٥
٣-١ مقدمة ١٢٧
٣-٢ التأين ١٢٧
٣-٣ تشكل طبقة متأينة في جو متجانس التركيب ١٣٠
٣-٤ تشكل عدة طبقات متأينة في الجو العلوي ١٣١
٣-٥ انكسار وانعكاس الأمواج الكهرطيسية في الجو المتأين ١٣٤
٣-٦ صفات طبقات الجو المتأين نتيجة المراقبة العملية ١٣٧
٣-٧ تأثير الدورة الإحدى عشرة سنوية لنشاط الشمس على طبقات الجو المتأين ١٣٨
٣-٨ الطرق التي تسلكها الأمواج الكهرطيسية السماوية المرسلة من هوائي إرسال إلى الجو المتأين ١٤٠
٣-٩ تخامد الأمواج السماوية في الجو المتأين ١٤١
٣-١٠ ظاهرة الخفوت ١٤٣

الفصل الرابع: انتشار الأمواج الطويلة جداً ١٤٥
٤-١ معالجة عامة لانتشار الأمواج الطويلة جداً ١٤٧
٤-٢ معالجة حالة انتشار مبسطة ١٥٠
٤-٣ خواص انتشار الأمواج الطويلة جداً ١٥٢
٤-٤ طرق حساب شدة الحقل في مجال الأمواج الطويلة جداً ١٥٤

الفصل الخامس : انتشار الأمواج الطويلة والمتوسطة ١٥٩
٥-١ معالجة عامة لانتشار الأمواج الطويلة والمتوسطة ١٦١
٥-٢ خواص انتشار الأمواج الطويلة والمتوسطة ١٦٢
٥-٣ طرق حساب شدة حقل الأمواج السماوية في مجال الأمواج الطويلة والمتوسطة ١٦٧

الفصل السادس : انتشار الأمواج القصيرة ١٧٣
٦-١ معالجة عامة لانتشار الأمواج القصيرة ١٧٥

٦-٢ شرطا تحقيق الاتصال اللاسلكي في مجال الأمواج القصيرة ١٧٨
٦-٣ ظواهر الخفوت في مجال الأمواج القصيرة وأنواع الخفوت ١٨٠
٦-٤ المنطقة الميتة في انتشار الأمواج القصيرة ١٨٣
٦-٥ تأثير اضطرابات الجو المتأين على الاتصالات اللاسلكية في مجال الأمواج القصيرة ١٨٥
٦-٦ تأثير الدورة الإحدى عشرة سنوية لنشاط الشمس على ظروف انتشار الأمواج القصيرة ١٨٦
٦-٧ طرق حساب شدة الحقل المستقبلة في مجال الأمواج القصيرة ١٨٧
٦-٨ تحديد استطاعة الإرسال ١٩٣

الفصل السابع : انتشار الأمواج القصيرة جداً والأمواج الميكروية ١٩٧
٧-١ تعاريف أساسية ١٩٩
٧-٢ تأثير الجو المتأين على انتشار الأمواج القصيرة جداً والأمواج الميكروية ١٩٩
٧-٣ الحالات المختلفة لانتشار الأمواج القصيرة جداً والأمواج الميكروية ٢٠٠
٧-٤ انتشار الأمواج القصيرة جداً والأمواج الميكروية إلى مسافات قصيرة حيث يمكن اعتبار سطح الأرض مستوياً ٢٠١
٧-٥ انتشار الأمواج القصيرة جداً والأمواج الميكروية على الأرض الكروية ولمسافات لا تتجاوز مدى خط النظر ٢٢١

الجـــزء الثـــاني

الهوائيـــــات ٢٢٩

الفصل الأول : الهوائي الديبول ٢٣١
١-١ الهوائي الديبول كدارة طنين مفرودة ٢٣٣
١-٢ الاهتزاز في دارة الطنين المركزة ودارة الطنين المفرودة (الهوائي الديبول) ٢٣٤
١-٣ الحقل القريب والحقل البعيد ٢٣٧
١-٤ توزع الجهد وتوزع التيار على هوائي ديبول بطول نصف الموجة ٢٣٨

١-٥ الدارة المكافئة للهوائي الديبول ٢٤١
١-٦ توزع الجهد وتوزع التيار على ديبول أطول بقليل أو أقصر بقليل من نصف طول الموجة ٢٤٣
١-٧ تعيير وترابط ديبول محرض بموجته الأساسية وديبولات محرضة بإحدى أمواجها التوافقية ٢٤٣

الفصل الثاني : الإشعاع من الهوائي ٢٤٩
٢-١ الهوائي الديبول بطول نصف الموجة ٢٥١
٢-٢ الهوائي المؤرض بطول ربع الموجة ٢٥٨

الفصل الثالث : أهم القيم المميزة للهوائي ٢٦١
٣-١ الاستطاعة المشعة من الهوائي ٢٦٣
٣-٢ المقاومة الإشعاعية للهوائي ٢٦٥
٣-٣ ممانعة مدخل الهوائي ٢٦٧

الفصل الرابع : تعيير الهوائيات بتحميلها ميكانيكياً وكهربائياً ٢٨٣
٤-١ تعيير الهوائيات بالتحميل الميكانيكي ٢٨٧
٤-٢ تعيير الهوائيات بالتحميل الكهربائي ٢٩٠

الفصل الخامس : الهوائيات عريضة المجال ٢٩٥

الفصل السادس : هوائيات الاستقبال ٣٠٣
٦-١ طريقة عمل هوائيات الاستقبال ودارتها المكافئة ٣٠٥
٦-٢ الهوائي الديبول المطوي ٣٠٩
٦-٣ الهوائي الإطاري ٣١١
٦-٤ الهوائيات ذات العواكس والموجهات ٣١٦

المقدمة

يضمّ هذا الكتاب منهاج مقرر انتشار الأمواج الكهرطيسية والهوائيات في الفصل الأول من السنة الرابعة قسم الالكترونيات والاتصالات في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق مع نحو ٢٠ % إضافات كان لابد منها لاستكمال توضيح بعض المواضيع. خصص لهذا المقرر ٤ ساعات نظرية وساعتان عمليتان اسبوعياً، لذلك تمت معالجة المواضيع الأساسية في انتشار الأمواج الكهرطيسية والهوائيات دون الغوص كثيراً في الاشتقاقات النظرية الرياضية للمعادلات والقوانين لأن ذلك معقد جداً ويستغرق وقتاً طويلاً، كما تم الاكتفاء بالتطبيقات العملية شائعة الاستعمال فقط وذلك بسبب محدودية الوقت المخصص للمقرر. ويمكن القول إن محتويات الكتاب وضعت بحيث تشكل حلاً وسطاً بين المعالجات النظرية والتطبيقات العملية.

الهدف من هذا المقرر هو دراسة خطوط الاتصال اللاسلكي الأرضية والسماوية في المجالات الترددية المختلفة ابتداءً من مجال الأمواج الطويلة جداً حتى مجال الأمواج القصيرة جداً والأمواج الميكروية. وتمت في هذا الكتاب معالجة خطوط الاتصال اللاسلكي هذه بدءاً من مخرج جهاز الإرسال إلى هوائي الإرسال ثم عبر وسط الانتشار إلى هوائي الاستقبال وانتهاءً بمدخل جهاز الاستقبال.

وبما أن مهمة الكتاب تغطية منهاج مقرر انتشار الأمواج الكهرطيسية والهوائيات لذلك وضع في جزءين. يعالج الجزء الأول انتشار الأمواج الكهرطيسية وهو مكون من سبعة فصول، ويعالج الجزء الثاني الهوائيات وهو مكون من ستة فصول، وذلك انسجاماً مع تسمية المقرر. وكان من الأجدى أن يفصل هذا الكتاب إلى كتابين يعالج أحدهما انتشار الأمواج الكهرطيسية ويعالج الأخر الهوائيات. صحيح أن عمل الهوائيات وأوساط الانتشار يكمل الواحد الآخر في خطوط الاتصال اللاسلكي، إلا أن المعالجات الفيزيائية والهندسية لكل منهما تختلف جذرياً عن الآخر. في الهوائيات نتعامل مع تيارات وجهود واستطاعات ومقاومات ودارات طنين بينما في انتشار الأمواج الكهرطيسية نتعامل مع حقول كهربائية وحقول مغناطيسية وانتشار هذه الحقول في الفضاء الحر، أي في أوساط عازلة كهربائياً، وفي أوساط نصف ناقلة.

كذلك كان من المفروض استخدام التسمية " انتشار الأمواج اللاسلكية " بدلاً من انتشار الأمواج

الكهرطيسية، نظراً لأن المقرر يعالج خطوط الاتصال اللاسلكي في المجالات الترددية المختلفة والتي تقع بين 30 *KHz* و 300 *GHz* . بينما تشمل الأمواج الكهرطيسية هذا المجال الترددي والترددات التي تقع دون 30 *KHz* . إضافة إلى الأشعة الحمراء والضوء المرئي والأشعة البنفسجية التي تختلف معالجتها بشكل جذري عن معالجة الأمواج اللاسلكية.

نأمل أن نكون قد وفقنا في تأليف هذا الكتاب بحيث يحقق الغاية المرجوة منه.

المؤلفون

الجزء الأول

انتشار الأمواج الكهرطيسية

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الأول

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

١- مواضيع عامة في انتشار الأمواج الكهرطيسية

١-١ مقدمة

أ- الأمواج اللاسلكية: هي الاهتزازات الكهرطيسية التي يقع ترددها بين $f_1 = 10^4\ Hz$ $(\lambda_1 = 30000m)$ و $f_2 = 10^{12}\ Hz$ $(\lambda_2 = 0.3mm)$. أما الأمواج التي ترددها أقل من f_1 فلا تستعمل في تقنية اللاسلكي، وتسمى الأمواج التي ترددها أكبر من f_2 الأشعة، ويلي f_2 مباشرة الأشعة تحت الحمراء الطويلة.

ب- تطبيقات الانتشار: يؤدي انتشار الأمواج اللاسلكية في التقنيات الحديثة دوراً كبيراً. وأهم مجالات تطبيقاته :

١- الأنواع المختلفة لنقل المعلومات لاسلكياً (البرق – الهاتف – نقل الصورة –الإذاعة – التلفزيون) .

٢- تحديد الموقع لا سلكياً

٣- الملاحة اللاسلكية

٤- الرادار

٥- تحديد الأعماق في البحار

٦- التحكم عن بعد لا سلكياً

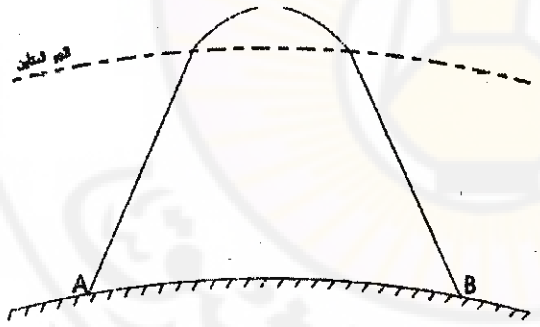
جـ – خط الاتصال اللاسلكي:

يتألف أي خط اتصال لاسلكي لنقل المعلومات لا سلكياً من ثلاثة أجزاء على الأقل.

١- جهاز الإرسال و هوائي الإرسال

٢- جهاز الاستقبال و هوائي الاستقبال

٣- الوسط الذي تنتشر فيه الأمواج الكهرطيسية

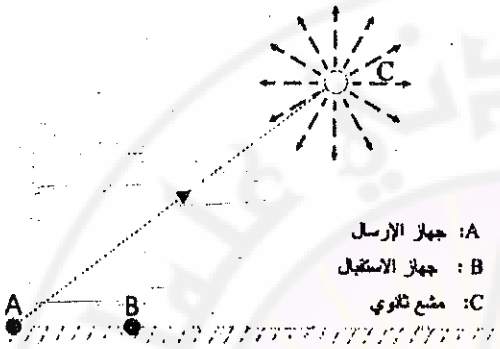


الشكل (١-١)

مثال لخط اتصال لاسلكي بسيط

و يبين الشكل (١-١) خط اتصال لا سلكي بسيط بين جهاز إرسال A و جهاز استقبال B مارا بالجو المتأين .

و تتميز أبسط أنواع خطوط الاتصال اللاسلكي بوجود جهاز الإرسال و جهاز الاستقبال عند نهايتي خط الاتصال اللاسلكي ، أكثر تعقيداً خط الاتصال اللاسلكي حيث جهاز الإرسال وجهاز الاستقبال موجودان في إحدى نهايتي خط الاتصال اللاسلكي وحيث يوجد في نهاية الخط الأخرى مشع ثانوي ، والمشع الثانوي هو جسم ناقل أو نصف ناقل يصبح بتأثير الأمواج الواردة إليه منبعاً لإشعاع ثانوي.



الشكل (١-٢)

مثال لخط اتصال لا سلكي ثانوي

ويبين الشكل (١-٢) الجسم C الذي يحرض بتأثير الأمواج الواردة إليه والمرسلة من A ليشع إشعاعاً ثانوياً (خطوط منقطة). ويمكن أن يستقبل جزءاً من الإشعاع الثانوي في المصدر A أو في منطقة أخرى كالمنطقة B . بذلك يمكن في مثل خطوط الاتصال اللاسلكي الثانوية هذه أن يكون جهاز الإرسال وجهاز الاستقبال موجودين في منطقتين مختلفتين ولا يشترط وجودهما في نفس المنطقة عند إحدى نهايتي الخط.

تستعمل خطوط الاتصال اللاسلكي من النوع الأول في نقل المعلومات لاسلكياً وفي عدد من طرق الملاحة اللاسلكية والتحكم عن بعد لاسلكياً. وتستعمل خطوط الاتصال اللاسلكي الثانوية في بعض طرق الملاحة وفي تحديد الموقع وقياس المسافة لاسلكياً.

الهدف من تحقيق أي خط اتصال لاسلكي هو دائماً نقل الإشارات . والفرق بين خطوط الاتصال اللاسلكي المختلفة هو فقط اختلاف شكل الإشارات المرسلة والتأثيرات الناجمة عنها في جهاز الاستقبال. فمثلاً عند نقل المعلومات لاسلكياً تنقل هذه الإشارات نصاً تلغرافياً أو مكالمة هاتفية أو صورة .... الخ.

أما في حالة التحكم عن بعد لاسلكياً فيتم بشكل عام نقل إشارات معقدة، بعكس ذلك تكون الإشارات في حالة تحديد الموقع لاسلكياً بسيطة، إذ تستعمل (عندما يكون الهوائي موجهاً ومعقداً) غالباً فقط نبضات ثابتة ذات شكل وعرض وتردد معين. وكذلك الأمر في حالة بعض طرق الملاحة اللاسلكية تكون الإشارات بسيطة.

بكلمات أخرى يمكن القول إن الأمواج الكهرطيسية المرسلة لأغراض مختلفة يختلف بعضها

عن بعض بشكل رئيسي باختلاف طرق تعديلها.

د- شروط الانتشار: يتعلق انتشار الإشارات الكهرطيسية بنوع هوائي الإرسال ونوع هوائي الاستقبال المستخدمين ومن الاختيار الصحيح لتردد التشغيل. ولا يضمن عمل جهاز الإرسال وجهاز الاستقبال بشكل سليم فقط تحقيق اتصال لاسلكي جيد، إذ من الممكن عند اختيار تردد تشغيل غير مناسب أن لاتصل الأمواج الكهرطيسية إلى مكان الاستقبال أو أن هذه الأمواج تتخامد في طريقها بحيث تصبح شدة الحقل في منطقة الاستقبال ضئيلة بشكل لا تؤمن معه استقبالاً جيداً للإشارات المرسلة.

هـ- تأثير وسط الانتشار: للوسط الواقع بين منطقة الإرسال ومنطقة الاستقبال الذي تنتشر فيه الأمواج الكهرطيسية (الجو – سطح الأرض) تأثيران على الأمواج الكهرطيسية وهما إضعاف الإشارات المرسلة وتشويه شكلها والمقصود بإضعاف الأمواج الكهرطيسية هو انخفاض شدة حقلها في طريق انتشارها من جهاز الإرسال إلى جهاز الاستقبال وله أسباب ثلاثة :

١- وصول جزء من القدرة المرسلة فقط إلى منطقة الاستقبال نتيجة انتشارها (توزعها) في جميع الاتجاهات .

٢- الامتصاص الذي تتعرض له الأمواج في الوسط الذي تنتشر فيه (تخامد)

٣- التأثير الظلي للحواجز الموجودة في طريق الإشعاع ، ولا سيما الظل الذي يسببه انحناء سطح الأرض .

وتتعلق جودة الاستقبال بشدة الحقل للموجة القادمة وبشكل الإشارات وبمستوى الضجيج .

مما سبق نرى أنه هناك مهمتين رئيسيتين عند دراسة حوادث انتشار الأمواج الكهرطيسية :

١- يجب أن يكون بالمستطاع حساب شدة الحقل المستقبلة لخط الاتصال اللاسلكي المراد تحقيقه، وكذلك تحديد الظروف التي يتم التوصل فيها إلى أفضل ظروف استقبال .

٢- يجب دراسة التشويه الذي يطرأ على الإشارات واتخاذ الإجراءات اللازمة لإنقاصه.

بالإضافة إلى هاتين المهمتين تنشأ مهام أخرى عند تطبيق الأمواج الكهرطيسية في الملاحة اللاسلكية وفي تحديد الموقع لاسلكياً وهي :

١- يجب تحديد اتجاه انتشار الأمواج الكهرطيسية.

٢- يجب تحديد زاوية طور الحقل الكهرطيسي .

٣- يجب تحديد تأثير الإشعاعات الثانوية للأجسام الواقعة ضمن حقل الأمواج (ضمن مسار

خط الاتصال اللاسلكي) وحساب شدة هذه الإشعاعات .

ولايمكن حل هذه المهام إلا بعد معرفة الحوادث الفيزيائية عند انتشار الأمواج الكهرطيسية.

١-٢ حساب شدة الحقل على بعد r من مشع نظري نقطي

قبل التطرق لتأثير سطح الأرض التخميدي و لتأثير طبقات الهواء المتأينة في الجو العلوي على انتشار الأمواج الكهرطيسية نعالج الآن الحالة المثالية التالية وهي انتشار الأمواج الكهرطيسية في وسط متجانس لا يمتص هذه الأمواج. نفترض أن الاهتزازات الكهرطيسية تنطلق من مشع نظري نقطي مثالي يشع في كل الاتجاهات بشكل متساوٍ.

نرمز بـ P للاستطاعة المشعة من منبع الاهتزازات و نفترض بأن المشع موجود في فضاء خالٍ من المادة. لتحديد كثافة تيار القدرة على بعد r من المشع نفترض أن القدرة المشعة تتوزع بشكل متساو على سطح كرة مركزها المشع ونصف قطرها r (الشكل ١-٣)، بذلك يكون تيار القدرة خلال وحدة السطح :

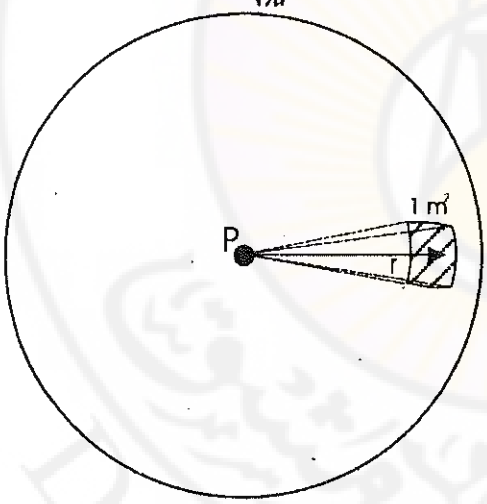
$$S = \frac{P}{4\pi r^2} \quad \left[W/m^2\right] \qquad (١-١)$$

حيث

S كثافة تيار القدرة

P الاستطاعة المشعة بالواط

r نصف قطر الكرة بالمتر



الشكل (١-٣): لتحديد شدة الحقل على بعد r من مشع نظري استطاعته p

من ناحية أخرى تساوي كثافة تيار القدرة للحقل الكهرطيسي القيمة المطلقة لشعاع بوينتنغ ($pointing$) الذي يساوي جداء شدة الحقل الكهربائي $E\left[V/m\right]$ و شدة الحقل المغناطيسي $H\left[A/m\right]$ ، أي :

$$S = E_{eff}.H_{eff} \left[W/m^2\right] \qquad (١-٢)$$

حيث E_{eff} و H_{eff} القيم الفعالة لشدة الحقل ويعطي جداؤهما القيمة المتوسطة لـــ S و لهزة كاملة.

كما سنستنتج فيما بعد ترتبط شدة الحقل الكهربائي وشدة الحقل المغناطيسي على مسافة كبيرة بما فيه الكفاية من جهاز الإرسال بالعلاقة التالية :

$$H = \frac{E}{120\pi}[A/m] \qquad (١-٣)$$

بذلك يمكن كتابة المعادلة (١-٢) على الشكل التالي :

$$S = \frac{E_{eff}^{\ 2}}{120\pi}[W/m^2] \qquad (١-٤)$$

بمساواة المعادلتين (١-١) و (١-٤) نحصل على شدة الحقل الكهربائي :

$$E_{eff} = \frac{\sqrt{30P}}{r}[V/m] \qquad (١-٥)$$

الهوائيات المستعملة في الحياة العملية هي دائماً هوائيات موجهة وليس لها الشكل النظري المشار إليه فيما سبق. ويعبر عن درجة التوجيه غالباً بعامل التوجيه أودرجة التوجيه أو الربح G . والعامل G هو قيمه بدون بعد، ويمثل درجة تركيز إشعاع الهوائي في الاتجاه المعني.

الهوائي الموجه الذي ربحه G والذي يشع الاستطاعة p ينتج في منطقة الاستقبال نفس شدة الحقل التي ينتجها الهوائي النظري الذي يشع الاستطاعة $G.P$. بذلك يكافئ استعمال هوائي موجه زيادة الاستطاعة المشعة من الهوائي غير الموجه G ضعفاً.

وبذلك نكتب المعادلة(١-٥) على الشكل التالي :

$$E_{eff} = \frac{\sqrt{30PG}}{r}[V/m] \qquad (١-٦)$$

وبما أن $E_{eff} = \frac{\hat{E}}{\sqrt{2}}$ حيث $\hat{E}$ مطال الموجة، يكون :

$$\hat{E} = \frac{\sqrt{60.P.G}}{r}[V/m] \qquad (١-٧)$$

إذا انتقلنا إلى وحدات أسهل من وجهة النظر العملية لشدة الحقل الكهربائي بالميلي فولت على المتر $[mV/m]$ وللاستطاعة المشعة بالكيلو واط $[KW]$ وللمسافة بالكيلومتر $[Km]$

تصبح المعادلة (١-٦) :

$$E_{eff} = \frac{173\sqrt{P_{1kW}G}}{r_{1km}}[mV/m] \qquad (١-٨)$$

ينسب عامل التوجيه أو الربح إلى الهوائي الديبول بطول نصف الموجة G' أو إلى الديبول القصير جداً G'' . بمراعاة أن ربح الهوائي الديبول بطول نصف الموجة بالنسبة للمشع النظري النقطي هو $G = 1.64$ و الديبول القصير جداً هو $G = 1.5$ نحصل على المعادلتين التاليتين للقيم الفعالة للحقل :

$$E_{eff} = \frac{222\sqrt{P_{1kW}G'}}{r_{1km}}[mV/m] \qquad (١-٩)$$

$$E_{eff} = \frac{212\sqrt{P_{1kW}G''}}{r_{1km}}[mV/m] \qquad (١-١٠)$$

و تسمى المعادلتين (١-٩) و (١-١٠) بمعادلتي شدة الحقل الكهربائي للانتشار المثالي للأمواج الكهرطيسية . و يمكن استخراج قيمة H_{eff} و $\hat{H}$ بنفس الطريقة .

عندما يكون المشع موجوداً مباشرة فوق سطح أرض مستوية ذات ناقلية مثالية تتوزع القدرة المشعة فقط على سطح نصف كرة . و تكافئ هذه الحالة بالتقريب الأول الظروف على سطح الأرض . عندها يجب ضرب المعادلات (١-٨)حتى (١-١٠) بالقيمة $\sqrt{2}$ و بذلك تأخذ معادلات القيم الفعالة الأشكال التالية :

$$E_{eff} = \frac{245\sqrt{P_{1kW}G}}{r_{1km}}[mV/m] \qquad (١-١١)$$

$$E_{eff} = \frac{314\sqrt{P_{1kW}G'}}{r_{1km}}[mV/m] \qquad (١-١٢)$$

$$E_{eff} = \frac{300\sqrt{P_{1kW}G''}}{r_{1km}}[mV/m] \qquad (١-١٣)$$

حيث: G الربح بالنسبة للمشع النظري

G' الربح بالنسبة للمشع بطول نصف الموجة

G'' الربح بالنسبة للمشع القصير جداً

تظهر المعادلات (١-٨) حتى (١-١٣) بشكل واضح الدور الذي تؤديه المسافة r بين المشع و نقطة الاستقبال . و تتناسب شدة الحقل عكساً مع المسافة في حالتي الانتشار كلتيهما المشار إليهما فيما سبق ، أي في الفضاء الحر و على سطح مستوي ناقل مثالي .

١-٣ انتشار الأمواج الكهرطيسية المستوية في وسط عازل كهربائي مثالي متجانس

عالجنا في المقطع السابق (١-٢) حالة مشع موجود في وسط متجانس ينتج أمواجاً كروية، وتكون الأمواج كروية عندما يكون السطح المشكل من زوايا الطور المتساوية للاهتزازات على شكل كرة يقع المشع في مركزها. وتحدد زاوية الطور φ لموجة ترددها ω من الطريق المقطوع r ومن سرعة الانتشار v بموجب العلاقة التالية :

$$\cos\ \omega\left(t - \frac{r}{v}\right) = \cos\left(\ \omega t - \frac{\omega r}{v}\right) = \cos\left(\ \omega t - \varphi\right)$$

و تكون سرعة انتشار الموجة v في وسط نظري و متجانس في جميع الاتجاهات متساوية. بذلك يكافئ الشرط $\varphi = \frac{\omega r}{v} = const$. أن $r = const.$ ، وهذا يكافئ معادلة الكرة في محاور الإحداثيات الكروية . كذلك ينتج المشع الموجود فوق سطح أرض مستو أو كروي أيضاً أمواجاً كروية .

بالإضافة إلى الأمواج الكروية تمتلك الأمواج المستوية التي ستعالج في هذا المقطع معنى كبيراً في الحياة العملية، ولا سيما الأمواج المستوية حيث السطح المشكل من زوايا الطور المتساوية هو سطح مستو عمودي على اتجاه الانتشار وتكون فيه أيضاً مطالات الاهتزازات متساوية.

لا يوجد في الحياة العملية حتى الآن طريقة لتوليد أمواج مستوية تماماً في وسط متجانس. إلا أنه يمكن اعتبار الأمواج الكروية أمواجاً مستوية على مسافة كبيرة من المشع وعندما نأخذ قطعة صغيرة من سطح الكرة. ويمكن مقارنة ذلك بقطعة صغيرة من سطح الكرة الأرضية عند اعتبارها مستوية.

بذلك يمكن منح الأمواج الكهرطيسية في منطقة الاستقبال صفات الأمواج المستوية عندما تكون هذه المنطقة على مسافة بعيدة بما فيه الكفاية من جهاز الإرسال. أما بالقرب من جهاز الإرسال أو عند مناقشة كل جبهة الأمواج فيجب مراعاة الخاصة الكروية لسطح الأمواج.

تحدد الصفات الكهرطيسية لوسط ما بالمعطيات التالية:

σ الناقلية النوعية وتساوي مقلوب المقاومة وبعدها $[1/\Omega m]$

ε ثابت العازلية الكهربائية و بعده $[F/m]$

μ ثابت النفوذية المغناطيسية و بعده $[H/m]$

في الفضاء الحر الخالي من الهواء :

يكون ثابت العازلية الكهربائية $[F/m]$ $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi}10^{-9}$ ويسمى ثابت العازلية الكهربائية المطلق .

و يكون ثابت النفوذية المغناطيسية $[H/m]$ $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ ويسمى ثابت النفوذية المغناطيسية المطلق. أما إذا احتوى الوسط الذي تنتشر فيه الأمواج الكهرطيسية مادة ما فيحدد ثابت العازلية الكهربائية النسبي ε_r وثابت النفوذية المغناطيسية النسبي μ_r لهذا الوسط كم مرة تكون ε و μ أكبر منها في الفضاء الحر

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \qquad \text{و} \qquad \varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

ε_r و μ_r هي أعداد مطلقة بدون بعد.

يعتبر الوسط عازلاً كهربائياً مثالياً متجانساً إذا كان في كل موضع منه:

$$\mu = \mu_0 \qquad \varepsilon = const. \qquad \sigma = 0 \qquad (١٤-١)$$

بالإضافة إلى ذلك يفترض أن العازل الكهربائي المثالي لا يحتوي شحنات كهربائية حرة. فإذا رمزنا لكثافة الشحنات بـ ρ مقاسة بـ $[coulomb/m^3]$ نحصل على الشرط الإضافي التالي:

$$\rho = 0 \qquad (١٥-١)$$

يمكن في أغلب الحالات منح طبقات الجو الدنيا صفات عازل كهربائي مثالي متجانس ثابت عازليته الكهربائية النسبي $\varepsilon_r = 1$. بذلك تكون صفات هذه الطبقات :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \qquad \varepsilon_r = 1 \qquad \mu = \mu_r \qquad \sigma = 0$$

وبما أن الأمواج الكروية تعتبر على مسافات بعيدة من المرسل أمواج مستوية تكتسب المعالجة التالية معنىً عملياً خاصاً.

تعالج الحوادث الكهرطيسية بواسطة مجموعة معادلات ماكسويل التي تكتب بالشكل العام التالي:

$$rot\underline{H} = \varepsilon\frac{\partial \underline{E}}{\partial t} + \sigma\underline{E} \qquad (١-١٦)$$

$$rot\underline{E} = -\mu\frac{\partial \underline{H}}{\partial t} \qquad (١-١٧)$$

$$div\underline{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \qquad (١-١٨)$$

$$div\underline{H} = 0 \qquad (١-١٩)$$

حيث $\underline{E}$ شعاع الحقل الكهربائي بـ $[V/m]$

$\underline{H}$ شعاع الحقل المغناطيسي بـ $[A/m]$

بمراعاة المعادلتين (١-١٤) و (١-١٥) يمكن كتابة معادلات ماكسويل للعازل الكهربائي المثالي المتجانس بالشكل التالي الأبسط :

$$rot\underline{H} = \varepsilon\frac{\partial \underline{E}}{\partial t} \qquad (١-١٦-أ)$$

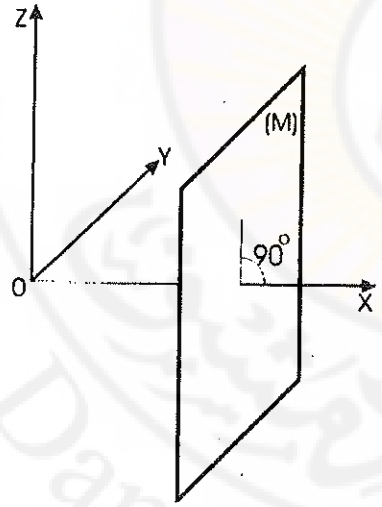
$$rot\underline{E} = -\mu_0\frac{\partial \underline{H}}{\partial t} \qquad (١-١٧-أ)$$

$$div\underline{E} = 0 \qquad (١-١٨-أ)$$

$$div\underline{H} = 0 \qquad (١-١٩-أ)$$

لمعالجة انتشار الأمواج الكهرطيسية المستوية في العازل الكهربائي المحدد أعلاه نختار محاور الإحداثيات الديكارتية المبينة في الشكل (١-٤) بحيث يكون المحور X عمودياً على مستوى زوايا الطور والمطالات المتساوية M .

إن اختيار محاور الإحداثيات بهذا الشكل مجد لأن قيم الشعاعين $\underline{E}$ و $\underline{H}$ في كل نقاط المستوي M متساوية ولا تتغير بتغير Y و Z.



الشكل (١-٤): اتجاه محاور الإحداثيات المختارة لمستوى زوايا الطور والمطالات المتساوية.

بذلك يمكن كتابة :

$$\frac{\partial \underline{E}}{\partial Y}=0 \quad ، \quad \frac{\partial \underline{E}}{\partial Z}=0 \quad ، \quad \frac{\partial \underline{H}}{\partial Y}=0 \quad ، \quad \frac{\partial \underline{H}}{\partial Z}=0 \qquad (١-٢٠)$$

مما يسهل العمليات الرياضية التالية كثيراً.

تمثل المعادلتان (١-١٦-آ) و (١-١٧-آ) مجموعة معادلات للمتغيرين $\underline{E}$ و $\underline{H}$. لحل مجموعة المعادلات هذه نزيل $\underline{H}$ ، ونحصل بموجب قواعد التحليل الشعاعي على العلاقة التالية :

$$\mu_0 \frac{\partial}{\partial t}(rot\,\underline{H}) = rot(rot\,\underline{E}) = grad(div\underline{E}) - \nabla^2 \underline{E} = -\nabla^2 \underline{E} \qquad (١-٢١)$$

نظراً لأنه بموجب الشرط (١-١٨-آ) $div\underline{E}=0$.

المقصود هنا بـــ ∇^2 (نبلا) مجموع المشتقات الثانية بالنسبة لمحاور الإحداثيات، أي:

$$\nabla^2 \underline{E} = \frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial z^2}$$

بتعويض قيمة $rot\underline{H}$ من المعادلة (١-١٦-آ) في المعادلة (١-٢١) نحصل على :

$$\varepsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial t^2} = \nabla^2 \underline{E} \qquad (١-٢٢)$$

وبشكل مكافئ، إذا أزلنا المتغير $\underline{E}$ نحصل على معادلة من نفس النوع لـــ $\underline{H}$:

$$\varepsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \underline{H}}{\partial t^2} = \nabla^2 \underline{H} \qquad (١-٢٣)$$

وتمثل المعادلتان التفاضليتان (١-٢٢) و (١-٢٣) معادلتي الأمواج . وبما أن هاتين المعادلتين متطابقتان سنعالج فيما يلي المعادلة الأولى.

بناءً على المعادلة (١-٢٠) نستطيع أن نفترض أن :

$$\nabla^2 \underline{E} = \frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial x^2}$$

بذلك تحصل المعادلة (١-٢٢) على الشكل التالي الأبسط :

$$\varepsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial x^2} \qquad (١-٢٤)$$

لمتابعة تبسيط المعادلة (١-٢٤) نكتب المعادلة (١-١٨-آ) بشكل مفصل :

$$div\underline{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

وبناء على المعادلة (١-٢٠) يكون :

$$\frac{\partial E_y}{\partial y} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

بذلك يجب أن يكون :

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = 0 \qquad (١-٢٥)$$

والحل الوحيد لهذه المعادلة هو :

$$E_x = 0 \qquad (١-٢٦)$$

لأن الحل $E_x = const.$ لا يتفق مع الشروط الحدية الحقيقية، أي لا يتفق مع الصفات الفيزيائية للموجة المنتشرة. إذا حللنا المعادلة الشعاعية (١-٢٤) إلى مركبات باتجاه محاور الإحداثيات وراعينا المعادلة (١-٢٦) نحصل على :

$$\varepsilon\mu_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} \quad ، \quad \varepsilon\mu_0 \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} \qquad (١-٢٧)$$

وبما أن هاتين المعادلتين متكافئتان نكتفي بمعالجة المعادلة الأولى، وحلها معروف من الفيزياء النظرية وهو التابع التالي:

$$E_y = f(t \mp \frac{x}{v}) \qquad (١-٢٨)$$

حيث f تابع يحدد من الشروط الحدية. يمكننا اختبار صحة هذا الحل بتعويض المعادلة (١-٢٨) في المعادلة الأولى من المعادلتين (١-٢٧):

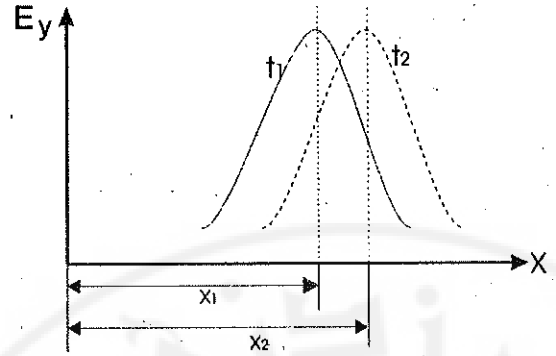
$$\varepsilon\mu_0 f''(t \mp \frac{x}{v}) = \frac{1}{v^2} f''(t \mp \frac{x}{v})$$

ومنه يكون:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu_0}} \qquad (١-٢٩)$$

وتظهر هذه النتيجة أن المعادلة (١-٢٨) تصلح لحل معادلة الأمواج إذا كانت قيمة الثابت v هي القيمة التي تم الحصول عليها في المعادلة (١-٢٩).

يظهر الشكل العام للتابع f بأنه لا يشترط أن يكون الحل تابعاً دورياً. نفترض أن شكل التابع f هو منحنٍ على شكل ناقوس، ونفترض أن الحقل الكهربائي في الفراغ موزع في اللحظة t_1 كالمنحني المبين في الشكل(١-٥):



الشكل (١-٥): التوزع الفراغي لشدة الحقل الكهربائي وذلك في لحظتين زمنيتين مختلفتين.

بذلك تكون القيمة العظمى للحقل موجودة في هذه اللحظة على بعد x_1 من مركز الإحداثيات. المطلوب تحديد مكان وجود القيمة العظمى للحقل في اللحظة $t_2>t_1$.

اختيار إشارة السالب في متغير تابع الأمواج (المعادلة ١-٢٨): نرمز للموضع الجديد للقيمة العظمى لشدة الحقل بـ x_2 فنحصل على المعادلة التالية :

$$E_y = f(t_1 - \frac{x_1}{v}) = f(t_2 - \frac{x_2}{v})$$

و بذلك :

$$t_1 - \frac{x_1}{v} = t_2 - \frac{x_2}{v} \qquad (١-٣٠)$$

من الشرط $t_2>t_1$ ينتج أن x_2 يجب أن تكون أيضاً أكبر من x_1. ذلك يعني أن القيمة العظمى للحقل وبذلك كل الموجة تنزاح بالاتجاه الموجب للمحور x . في اللحظة t_2 تأخذ الموجة الموضع المبين بالخط المنقط في الشكل (١-٥).

يمكن تحديد سرعة انتشار الأمواج الكهرطيسية من المعادلة (١-٣٠):

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \qquad (١-٣١)$$

بذلك يمتلك الحد v الذي نتج في حل معادلة الأمواج معناً فيزيائياً، إذ تمثل v سرعة انتشار الأمواج الكهرطيسية.

اختيار إشارة الموجب في متغير تابع الأمواج: بعد إجراء نفس المناقشة السابقة نرى أن هذه الحالة تكافئ انتشار الأمواج بنفس السرعة ولكن باتجاه معاكس، أي بالاتجاه السالب للمحور x :

$$v = \frac{x_1 - x_2}{t_2 - t_1} \qquad (١-٣٢)$$

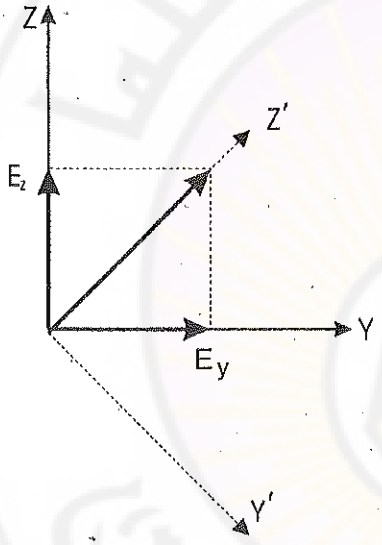
لتحديد سرعة انتشار الأمواج الكهرطيسية ننطلق من المعادلة (١-٢٩) والعلاقة $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ونحصل على:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} [m/s]$$

بتعويض قيمتي ε_0 و μ_0 المعطاة مسبقاً نحصل على:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \frac{1}{\sqrt{\frac{4\pi}{36\pi} \cdot 10^{-16} \left[F/m \cdot H/m\right]}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\varepsilon_r}} \left[m/s\right] \qquad (١-٣٣)$$

في الهواء نعتبر أن $\varepsilon_r = 1$. بذلك تكون سرعة انتشار الأمواج الكهرطيسية فيه مساوية لسرعة انتشار الضوء في الفراغ $v = 3 \cdot 10^8 [m/s]$.



الشكل (١-٦): إدارة محاور الإحداثيات حول المحور x

تظهر المعادلتان (١-٢٧) أنه في حالة الاتجاه المفترض لمحاور الإحداثيات (الشكل ١-٤) يمتلك الحقل الكهربائي للموجة الكهرطيسية مركبتين فقط ، إحداهما في الاتجاه Y والأخرى في الاتجاه Z . لتسهيل إجراء العمليات الحسابية ندير المحورين Y و Z حول المحور X بحيث ينطبق المحور Z مع اتجاه شعاع محصلة الحقل الكهربائي للموجة الكهرطيسية وبحيث تصبح مركبة شعاع الحقل الكهربائي على المحور Y مساوية للصفر ($E_y = 0$) كما هو مبين في الشكل (١-٦).

في محاور الإحداثيات الجديدة نحصل على المعادلات التالية للحقل الكهربائي منطلقين منها لتحديد معادلات الحقل المغناطيسي:

$$E_x = 0 \qquad E_y = 0 \qquad E_z = f(t \mp \frac{x}{v}) \quad (٣٤-١)$$

من معادلة ماكسويل الثانية (معادلة ١-١٧-آ) مكتوبة بشكل مفصل نحصل :

$$\left.\begin{aligned} -\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \\ -\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ -\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \end{aligned}\right\} \qquad (٣٥-١)$$

من النتيجة التي تم التوصل إليها في المعادلة (١-٢٠) نرى أن قيم جميع الاشتقاقات بالنسبة للمتغيرين y و z تساوي الصفر. ومن المعادلة (١-٣٤) نرى أن قيمة $E_x = F_y = 0$. بذلك تصبح المعادلات (١-٣٥) كما يلي:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial t} &= 0 \\ \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} &= 0 \end{aligned}\right\} \qquad (٣٦-١)$$

وبنفس الطريقة التي اتبعت في اشتقاق المعادلة (١-٢٥) نحصل على:

$$H_z = 0 \qquad \text{و} \qquad H_x = 0$$

نعوض الآن قيمة E_z من المعادلة (١-٣٤) في المعادلة (١-٣٦) ونشتق فنحصل على:

$$\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} = \mp \frac{1}{v} f'(t \mp \frac{x}{v}) \qquad (٣٧-١)$$

نعوض $\frac{1}{v} = \sqrt{\varepsilon \mu_0}$ ونجري التكامل على طرفي المعادلة (١-٣٧) مع وضع ثابت التكامل مساوياً للصفر (انطلاقاً من نفس الفكرة السابقة) فنحصل :

$$H_y = \mp \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu_0}} E_z = \mp \sqrt{\varepsilon_r} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} f(t \mp \frac{x}{v}) [A/m] \qquad (٣٨-١)$$

بتعويض قيمتي ε_0 و μ_0 في $\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}$ يكون:

$$\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} = \sqrt{\frac{10^7}{36\pi \cdot 4\pi \cdot 10^9}}[F/H] = \frac{1}{120\pi}[1/\Omega] \qquad (١-٣٩)$$

وتصبح المعادلة (١-٣٨):

$$H_y = \mp \frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{120\pi} f(t \mp \frac{x}{v}) \qquad (١-٤٠)$$

عند انتشار الأمواج الكهرطيسية في الهواء نعتبر أن $\varepsilon_r = 1$ ، بذلك تصبح H_y :

$$H_y = \mp \frac{1}{120\pi} f(t \mp \frac{x}{v})[A/m] \qquad (١-٤١)$$

للقيمة $\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi[\Omega]$ بعد المقاومة وتسمى المقاومة المميزة لانتشار الأمواج الكهرطيسية في الفضاء الحر ويرمز لها بالحرف Z_0 . وتعتبر بشكل تقريبي المقاومة المميزة للجو المملوء بالهواء عند انتشار الأمواج الكهرطيسية فيه:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi[\Omega] = 377[\Omega]$$

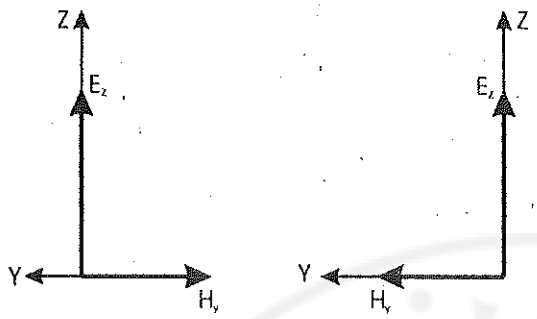
تظهر مقارنة المعادلتين (١-٣٤) و(١-٤١) أن لحقلي الموجة الكهربائي و المغناطيسي نفس زاوية الطور. أما اتجاها الشعاعين $\underline{E}$ و $\underline{H}$ الواحد بالنسبة للآخر فيمكن استنتاجه من إشارتي السالب و الموجب في المعادلة (١-٤١).

عندما تنتشر الموجة في اتجاه المحور x الموجب تكون إشارة السالب سارية المفعول كما رأينا سابقاً. وإذا كان في لحظة ما اتجاه شعاع الحقل الكهربائي باتجاه المحور z الموجب يكون بنفس الوقت اتجاه شعاع الحقل المغناطيسي باتجاه المحور Y السالب.

في اتجاه الانتشار المعاكس يتغير اتجاه الشعاع $\underline{H}$ مع محافظة الشعاع $\underline{E}$ على وضعه. ويبين الشكل (١-٧) الترتيبين المتعاكسين للشعاعين $\underline{E}$ و $\underline{H}$ لاتجاهي الانتشار .

تظهر المعادلة (١-٤١) بأننا نحصل على شدة الحقل المغناطيسي $[A/m]$ إذا قسمنا شدة الحقل الكهربائي $[V/m]$ على المقاومة المميزة للوسط $[\Omega]$.

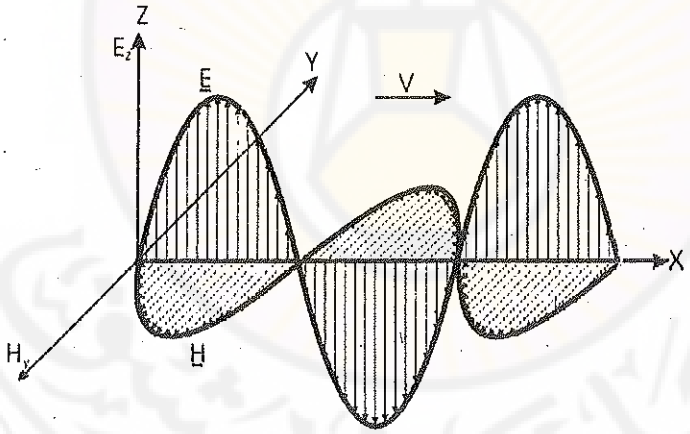
يحدد شكل تابع الأمواج من الشروط الابتدائية. وبما أن الأمواج الكهرطيسية تشع من هوائي



الشكل(١-٧): اتجاها شعاع الحقل الكهربائي $\underline{E}$ وشعاع الحقل المغناطيسي $\underline{H}$ الواحد بالنسبة للآخر عند الانتشار في عازل كهربائي مثالي متجانس :
أ) تبتعد الموجة عن الناظر ب) تقترب الموجة من الناظر

تسري فيه تيارات متناوبة ذات ترددات عالية يكون تابع الأمواج في الحالات العملية غالباً تابعاً دورياً متغيره $(t \mp \frac{x}{v})$. انطلاقاً من هذه الفكرة يمكن التعبير عن مركبات الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي لموجة مستوية بموجب المعادلتين (١-٣٤) و(١-٤١) بالمعادلات التالية:

$$\left.\begin{aligned} E_x &= 0 & H_x &= 0 \\ E_y &= 0 & H_y &= \mp\frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{120\pi}\hat{E}\cos\omega(t \mp \frac{x}{v}) \\ E_z &= \hat{E}\cos\omega(t \mp \frac{x}{v}) & H_z &= 0 \end{aligned}\right\} \quad (١-٤٢)$$



الشكل (١-٨): الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي لموجة كهرطيسية مستوية تنتشر في عازل كهربائي مثالي متجانس.

وتمكن المعادلات (١-٤١) من تحديد العلاقات الفراغية بين أشعة الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي للموجة بوضوح. ويبين الشكل (١-٨) هذه العلاقات في لحظه زمنية معينة وذلك عندما يكون الانتشار باتجاه المحور x الموجب.

من المعادلات (١-٤٢) وكما يتضح من الشكل (١-٨) نستطيع تحديد صفات الموجة الكهرطيسية المستوية عند انتشارها في عازل كهربائي مثالي متجانس كما يلي:

١- في كل نقطة من الفضاء يكون شعاع الحقل الكهربائي للموجة عمودياً على شعاع الحقل المغناطيسي لهذه الموجة، ويكون كلا الشعاعين عمودياً على اتجاه انتشار الموجة.

٢- تكون الأمواج الكهرطيسية أمواجاً عرضانية كهرطيسياً لأنه لا يوجد للحقل الكهربائي أو للحقل المغناطيسي مركبات في اتجاه الانتشار.

٣- ينتشر الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي للموجة بنفس السرعة v ، حيث :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu_0}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\varepsilon_r}} [m/s] = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

٤- للحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي نفس زاوية الطور في أي نقطة من الفضاء.

٥- يرتبط مطال شدة الحقل الكهربائي ومطال شدة الحقل المغناطيسي للموجة بالعلاقة:

$$\hat{H} = \frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{120\pi} \hat{E} = \frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{Z_0} \hat{E}$$

٦- يحدد اتجاه انتشار الموجة الكهرطيسية بالجداء الشعاعي $\underline{E} \times \underline{H}$ (الشكل ١-٨).

١-٤ انتشار الأمواج الكهرطيسية المستوية في وسط نصف ناقل متجانس

لمعالجة انتشار الأمواج الكهرطيسية في أنصاف النواقل أهمية كبيرة في الحياة العملية، مثل معالجة اختراق الأمواج الكهرطيسية لسطح البحر وانتشارها في مياهه واختراقها لسطح الأرض وانتشارها في طبقاتها. كذلك تمتلك الطبقات المتأينة للجو العلوي صفات نصف الناقل، وتمنح فقط طبقات الهواء السفلى غير المتأينة صفات العازل الكهربائي المثالي.

تحدد الصفات الكهرطيسية للوسط نصف الناقل بالقيم:

$$\mu = \mu_0 \text{ و } \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \text{ و } \sigma \neq 0 \text{ و } \rho = 0$$

عند معالجة انتشار الأمواج الكهرطيسية في وسط نصف ناقل يجب الانطلاق من معادلات ماكسويل (١-١٦) حتى (١-١٩)، والمعادلة الأولى من هذه المعادلات هي:

$$rot \underline{H} = \varepsilon \frac{\partial \underline{E}}{\partial t} + \sigma \underline{E} \qquad (١-١٦)$$

وسنكتفي بمعالجة الحالة التي يتغير فيها الحقل الكهربائي للموجة بعلاقة الزمن بموجب القانون التالي:

$$\underline{E}(t) = \underline{\hat{E}} \cdot e^{j\omega t} \qquad (٤٣-١)$$

حيث $\underline{E}(t)$ القيمة اللحظية العقدية لشدة الحقل.

$\underline{\hat{E}}$ مطال شدة الحقل العقدي.

باشتقاق المعادلة (١-٤٣) نستطيع كتابة $\underline{E}$ بالشكل التالي:

$$\underline{E} = -\frac{j}{\omega} \cdot \frac{\partial \underline{E}}{\partial t} \qquad (٤٤-١)$$

نعوض هذه المعادلة بالمعادلة (١-١٦) فنحصل:

$$rot\,\underline{H} = (\varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega}) \cdot \frac{\partial \underline{E}}{\partial t} \qquad (٤٥-١)$$

بمقارنة هذه المعادلة الشعاعية بمعادلة ماكسويل (١ ١٦) الخاصة بالعازل الكهربائي المثالي نرى أن قيمة ثابت العازلية الكهربائية ذي القيمة الحقيقية في العازل الكهربائي المثالي قد أصبحت قيمة عقدية في الوسط نصف الناقل ونرمز لها بـــ ε_k حيث:

$$\varepsilon_k = \varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \qquad (٤٦-١)$$

وتسمى ε_k ثابت العازلية الكهربائية العقدي. أي أنه عند انتشار أمواج كهرطيسية ترددها ω في وسط نصف ناقل قيمه الكهربائية σ و ε يمكننا معالجة هذا الوسط كعازل كهربائي ذي عازلية كهر بائية عقدية ε_k بدلاً من العازلية الكهربائية الحقيقية ε. ونستعمل حينئذ في حسابات انتشار الأمواج الكهرطيسية في وسط نصف ناقل معادلات الانتشار في وسط عازل كهربائي مثالي بعد تبديل ثابت العازلية الكهربائية الحقيقي ε بثابت العازلية الكهربائية العقدي ε_k. من المعادلة (١-٤٦) نستخرج قيمة ثابت العازلية الكهربائية العقدي النسبي :

$$\varepsilon_{kr} = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \qquad (٤٦-١-أ)$$

بتعويض قيمة ε_0 واستبدال التردد بطول الموجة تصبح المعادلة (١-٤٦-أ):

$$\varepsilon_{kr} = \varepsilon_r - j60\lambda\sigma \qquad (٤٦-١-ب)$$

لتحديد شدة الحقل الكهربائي لموجة كهرطيسية تنتشر في وسط نصف ناقل نكتب معادلة E_z من المعادلات (١-٤٢) بالشكل العقدي :

$$\underline{E}_z = \hat{E} \cdot e^{j\omega(t-\frac{x}{v})} \qquad (٤٧-١)$$

حيث $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{kr}}}$ ، وحيث كتبت إشارة السالب في الأس فقط للسهولة.

نحلل العدد العقدي $\sqrt{\varepsilon_{kr}}$ إلى جزءين الأول حقيقي والآخر تخيلي بالشكل التالي:

$$\sqrt{\varepsilon_{kr}} = n - jk \qquad (٤٨-١)$$

ونعوض في المعادلة (١-٤٧) فنحصل:

$$\underline{E}_z = \hat{E} \cdot e^{-\frac{\omega k}{c}x} \cdot e^{j\omega(t-\frac{n}{c}x)} \qquad (٤٩-١)$$

بالتحويل إلى الشكل المثلثي الاعتيادي تأخذ المعادلة (١-٤٩)الشكل التالي:

$$E_z = \hat{E} \cdot e^{-\delta \cdot x} \cos\omega(t - \frac{x}{v}) \qquad (٥٠-١)$$

حيث:

$$\left.\begin{aligned} \delta &= \frac{\omega k}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot k \\ v &= \frac{c}{n} \end{aligned}\right\} \qquad (٥١-١)$$

حيث δ ثابت امتصاص الوسط نصف الناقل و v سرعة انتشار الموجة الكهرطيسية في الوسط نصف ناقل.

بمقارنة المعادلة (١-٥٠) بالمعادلة (١-٤٢) الخاصة بانتشار الأمواج الكهرطيسية في وسط عازل كهربائي مثالي نلاحظ الاختلافين التاليين:

١ يوجد في المعادلة (١-٥٠) الحد $e^{-\delta \cdot x}$ الذي يدل على أن الوسط نصف الناقل يمتص الأمواج الكهرطيسية عند انتشارها فيه، أي يسبب تناقص مطال الموجة.

٢- تختلف سرعة انتشار الأمواج الكهرطيسية في الوسط نصف الناقل عنها في العازل الكهربائي المثالي.

ومن المعادلات (١-٤٢) تصبح شدة الحقل المغناطيسي للموجة في الوسط نصف الناقل بالشكل التالي :

$$\underline{H}_y = -\frac{\sqrt{\varepsilon_{kr}}}{120\pi} \cdot \hat{E} \cdot e^{-\frac{\omega k}{c}x} \cdot e^{j\omega(t-\frac{n}{c}x)}$$

بتعويض قيمة $\sqrt{\varepsilon_{kr}}$ من المعادلة (١-٤٨) بعد كتابتها بالشكل التالي:

$$\sqrt{\varepsilon_{kr}} = n - jk = \sqrt{n^2 + k^2} \cdot e^{-j \cdot arc \,.\tan \frac{k}{n}} \qquad (٥٢-١)$$

تصبح قيمة H_y :

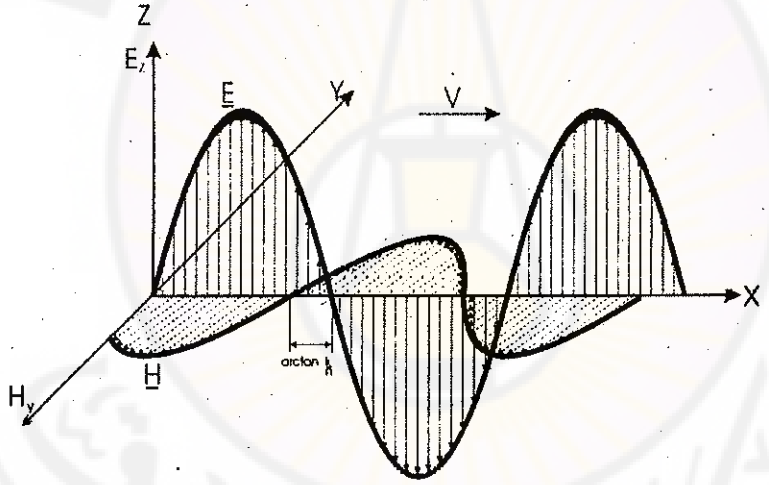
$$H_y = -\frac{\sqrt{n^2 + k^2}}{120\,\pi} \cdot \hat{E} \cdot e^{-\delta x} \cos\left[\omega(t - \frac{x}{v}) - arc \,.\tan \frac{k}{n}\right] \qquad (٥٣-١)$$

بمقارنة هذه المعادلة بالمعادلة المكافئة (١-٤٢) الخاصة بالانتشار في عازل كهربائي مثالي نرى أنه بالإضافة إلى الاختلافين المشار إليهما فيما سبق بالنسبة للحقل الكهربائي يوجد هناك الاختلافان التاليان:

٣- اختلاف بين زاوية طور الحقل الكهربائي وزاوية طور الحقل المغناطيسي.

٤- اختلاف مطال الحقل المغناطيسي في الوسط نصف الناقل عنه في العازل الكهربائي المثالي.

ويبين الشكل (١-٩) بنية الحقل الكهرطيسي عند الانتشار في وسط نصف ناقل.



الشكل (١-٩): الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي لموجة كهرطيسية مستوية تنتشر في وسط نصف ناقل متجانس

من المعادلتين (١-٥٠) و (١-٥٣) نستطيع الآن تحديد صفات موجة كهرطيسية تنتشر في وسط نصف ناقل متجانس كما يلي:

١- في كل نقطة من نقاط الوسط نصف الناقل يكون شعاع الحقل الكهربائي للموجة عمودياً على شعاع الحقل المغناطيسي لهذه الموجة، ويكون كلا الشعاعين عمودياً على اتجاه الانتشار كما في حالة الانتشار في وسط عازل كهربائي مثالي.

٢- تكون الأمواج الكهرطيسية المنتشرة موجات إعرضانية كهرطيسياً كما في حالة الانتشار في عازل كهربائي مثالي.

٣- يتم امتصاص الموجة عند انتشارها، وبسبب الامتصاص نقصان مطال الحقلين الكهربائي والمغناطيسي للموجة. ويحدد عامل الامتصاص $e^{-\delta x}$ مقدار هذا النقصان حيث ثابت الامتصاص $\delta = \frac{\omega}{c} k$.

٤- ينتشر الحقلان الكهربائي والمغناطيسي للموجة بنفس السرعة $v = \frac{c}{n}$ ، $(v < c)$.

٥- تنزاح زاوية طور الحقل المغناطيسي عن زاوية طور الحقل الكهربائي بمقدار φ في كل نقطة من نقاط الوسط نصف الناقل، حيث: $\varphi = arc.\tan\frac{k}{n}$.

٦- يرتبط مطال الحقل المغناطيسي ومطال الحقل الكهربائي بالعلاقة التالية:

$$\hat{H} = \frac{\sqrt{n^2 + k^2}}{120\pi} \cdot \hat{E}$$

٧- يحدد طول الموجة بالعلاقة $\lambda' = \frac{\lambda}{n}$ ، ويكون طول الموجة في الوسط نصف الناقل λ' أصغر منه في العازل الكهربائي المثالي λ (لنفس تردد الموجة).

لتحديد قيمتي الحدين k, n الموجودتين في معادلة سرعة الانتشار ومعادلة مطال الحقل المغناطيسي للموجة نربع طرفي المعادلة (١-٤٨) ونساويها بالمعادلة (١-٤٦-ب) :

$$\varepsilon_{kr} = \varepsilon_r - j60\lambda\sigma = n^2 - k^2 - j2nk$$

بمساواة الجزءين الحقيقيين والجزءين التخيليين الواحد مع الآخر في هذه المعادلة نحصل على المعادلتين التاليتين :

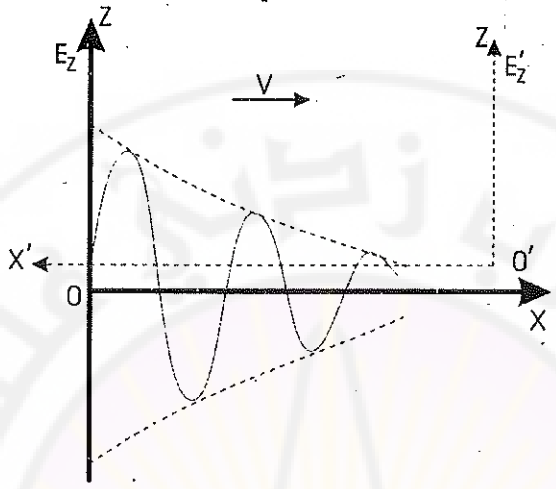
$$\left.\begin{aligned} n^2 - k^2 &= \varepsilon_r \\ n \cdot k &= 30\lambda\sigma \end{aligned}\right\} \qquad (١-٥٤)$$

بحل المعادلتين (١-٥٤) بالنسبة للمتغيرين n و k نحصل:

$$n = \pm\sqrt{\frac{1}{2}\left[\varepsilon_r + \sqrt{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}\right]} \qquad (١-٥٥)$$

$$k = \pm\sqrt{\frac{1}{2}\left[-\varepsilon_r + \sqrt{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}\right]} \qquad (١-٥٦)$$

لكلتا الإشارتين قبل الجذر نفس المعنى كالإشارتين قبل تابع الأمواج، إذ تعبران عن اتجاه انتشار الأمواج الكهرطيسية بالنسبة لنقطة الانطلاق المختارة. ويوضح الشكل (١-١٠) ذلك بيانياً، إذ يبين المركبة الكهربائية لحقل الموجة في وسط شديد الامتصاص:



الشكل (١-١٠): لتوضيح الإشارة المزدوجة قبل n و k

- يعبر عن تغير المطال بالنسبة لمراقب موجود في النقطة 0 بالعامل $e^{-\delta x}$ (إشارة الموجب في المعادلة ١-٥٦).
- يعبر عن تغير المطال بالنسبة لمراقب موجود في النقطة '0 بالعامل $e^{\delta x}$ (إشارة السالب في المعادلة ١-٥٦) وذلك لنفس اتجاه انتشار الموجة.
- في الحالة الأولى يتناقص المطال كلما بعدت الموجة عن المراقب، وفي الحالة الثانية يتناقص المطال كلما قربت الموجة من المراقب.
- يمكن تقريب المعادلتين (١-٥٥) و (١-٥٦) كثيراً لبعض الحالات الكثيرة الوجود في الحياة العملية. وسنناقش فيما يلي هذه الحالات.

أ- تبسيط معادلتي n و k للوسط نصف الناقل الذي تكون صفاته الكهربائية قريبة من صفات العازل الكهربائي المثالي.

بما أن صفات العازلية لوسط ما تقيم بكثافة تيارات الانزياح i_ε ، وقيمة الناقلية الكهربائية لوسط ما تقيم بكثافة تيارات النقل i_l ، نستطيع تقويم صفات نصف الناقل بقيمتي هذين التيارين معاً. تحدد كثافة تيارات الانزياح وكثافة تيارات النقل بالمعادلتين التاليتين بناء على وحدات القياس المختارة هنا.

$$\underline{i}_v = \varepsilon \frac{\partial \underline{E}}{\partial t} = j\omega\varepsilon\, \underline{E}\left[A/m^2\right] \qquad (٥٧-١)$$

$$\underline{i}_l = \sigma\, \underline{E}\left[A/m^2\right] \qquad (٥٨-١)$$

وتكون نسبة هذين التيارين للاهتزازات الكهرطيسية التي ترددها ω هي:

$$\frac{i_v}{i_l} = \frac{\omega\varepsilon_r\varepsilon_0}{\sigma} = \frac{\varepsilon_r}{60\lambda\sigma} \qquad (٥٩-١)$$

وتكون هذه النسبة أكبر من الواحد بكثير في الحالة المناقشة هنا.

$$\frac{\varepsilon_r}{60\lambda\sigma} >> 1 \qquad \Rightarrow \qquad \varepsilon_r >> 60\lambda\sigma \qquad (٦٠-١)$$

بناء على المعادلة (١-٦٠) نستطيع إهمال الحد الثاني تحت الجذر الداخلي في المعادلة (١-٥٥) فنحصل:

$$n \approx \sqrt{\varepsilon_r} \qquad (٦١-١)$$

ولا يمكن تطبيق طريقة التقريب هذه على k، إلا أننا نستطيع تطبيق معادلة نيوتن البينوميه $\left[(1+y)^{\frac{1}{2}} \approx 1+\frac{y}{2}\right]$ على الجذر الداخلي للمعادلة(١-٥٦) فنحصل:

$$k = \sqrt{-\frac{\varepsilon_r}{2} + \frac{\varepsilon_r}{2}\left[1+\left(\frac{60\lambda\sigma}{\varepsilon_r}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \approx \sqrt{-\frac{\varepsilon_r}{2} + \frac{\varepsilon_r}{2} + \frac{(60\lambda\sigma)^2}{4\varepsilon_r}} \qquad (٦٢-١)$$

$$= \frac{60\lambda\sigma}{2\sqrt{\varepsilon_r}}$$

نعوض القيمتين اللتين تم الحصول عليهما لـ n و k في المعادلتين (١-٥١) فنحصل بالنسبة لسرعة الانتشار:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{3\cdot 10^8}{\sqrt{\varepsilon_r}}\left[m/s\right] \qquad (٦٣-١)$$

وبالنسبة لعامل الامتصاص :

$$\delta = \frac{\omega}{c}\cdot k = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot k = \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{\varepsilon_r}}\left[m^{-1}\right] \qquad (٦٤-١)$$

ب- تبسيط معادلتي n و k للوسط نصف الناقل الذي تكون صفاته الكهربائية قريبة من صفات الناقل:

يتحقق الشرط التالي عندما تكون كثافة تيارات النقل أكبر بكثير من كثافة تيارات الانزياح:

$$\varepsilon_r << 60\lambda\sigma \qquad (١-٦٥)$$

بالتعويض في المعادلتين (١-٥٥) و (١-٥٦) نحصل:

$$n \approx \sqrt{30\lambda\sigma} \qquad (١-٦٦)$$

$$k \approx \sqrt{30\lambda\sigma} \qquad (١-٦٧)$$

بالتعويض في المعادلتين (١-٥١) نحصل:

$$v = \frac{c}{\sqrt{30\lambda\sigma}} = \frac{3\cdot 10^8}{\sqrt{30\lambda\sigma}}[m/s] \qquad (١-٦٨)$$

$$\delta = \frac{\omega}{c}k = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot\sqrt{30\lambda\sigma} = 2\pi\sqrt{\frac{30\sigma}{\lambda}}[m^{-1}] \qquad (١-٦٩)$$

مثال ١-١ :

تخترق أمواج كهرطيسية سطح أرض جافة وتنتشر ضمن طبقاتها وسطح البحر وتنتشر ضمن مياهه والمطلوب :

١- بعد أي مسافة x تقطعها الأمواج الكهرطيسية داخل الوسطين المذكورين ينخفض مطال شدة الحقل إلى 10^{-6} من قيمته تحت سطح الأرض مباشرة وتحت سطح البحر مباشرة.

٢- احسب سرعة انتشار الأمواج الكهرطيسية في الوسطين المذكورين.

٣- احسب طول الموجة للأمواج الكهرطيسية عند انتشارها في الوسطين المذكورين.

يطلب إجراء الحسابات السابقة عندما يكون طول الموجة في الهواء :

$$\lambda_1 = 20000m \quad \lambda_2 = 2000m \quad \lambda_3 = 200m \quad \lambda_4 = 20m \quad \lambda_5 = 2m$$

علماً بأن القيم الكهربائية للأرض الجافة $\varepsilon_r = 4$ $\sigma = 0.001[1/\Omega m]$

ولمياه البحر $\varepsilon_r = 80$ $\sigma = 4[1/\Omega m]$

المطلوب أيضاً إدراج نتائج الحساب في قائمتين بعلاقة طول الموجة في الهواء ومقارنة هذه النتائج بعضها مع بعض.

الحل:

يجب أن يبتدئ حل المسألة بتحديد النسبة $\frac{i_v}{i_l}$ بموجب المعادلة (١-٥٩) :

$$\frac{i_v}{i_l} = \frac{\varepsilon_r}{60\lambda\sigma}$$

بذلك نستطيع تحديد أي المعادلات يمكن استعمالها في إجراء العمليات الحسابية .

١- تحديد المسافة x

من المعادلة (١-٥٠) :

$$E_z = \hat{E} \cdot e^{-\delta x} \cos\ \omega(t - \frac{x}{v})$$

نرى أن الحد $e^{-\delta x}$ يحدد درجة تخامد مطال شدة الحقل داخل وسط ما. بذلك يكون :

$$\frac{\hat{E}_z}{E} = e^{-\delta x} = 10^{-6}$$

ومنه

$$x = \frac{6\ln 10}{\delta} = \frac{13,81}{\delta}[m]$$

وتتعلق المسافة x التي بعد قطعها يتخامد مطال شدة الحقل إلى 10^{-6} من قيمته عند $x = 0$ بثابت تخامد الوسط الذي يتم فيه الانتشار δ من المعادلة (١-٥١) بذلك تصبح x :

$$x = \frac{13,81 \cdot \lambda}{2\pi \cdot k} = 2.2\frac{\lambda}{k}$$

نحدد قيمة k من المعادلات (١-٥١) أو (١-٦٤) أو (١-٦٩) حسبما تكون النسبة:

$$\frac{i_v}{i_l} = \frac{\varepsilon_r}{60\lambda\sigma}$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot k \quad ، \quad k = \sqrt{\frac{1}{2}\left[-\varepsilon_r + \sqrt{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma^2)}\right]} \qquad (١-٥١)$$

١- عندما تكون صفات الوسط نصف الناقل قريبة من صفات الوسط العازل $\varepsilon_r >> 60\lambda\sigma$.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} k = \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{\varepsilon_r}}[m^{-1}] \qquad (١-٦٤)$$

٢- عندما تكون صفات الوسط نصف الناقل قريبة من صفات الوسط الناقل $\varepsilon_r << 60\lambda\sigma$.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{30\lambda\sigma} = 2\pi\sqrt{\frac{30\sigma}{\lambda}}[m^{-1}] \qquad (١-٦٩)$$

٢- سرعة الانتشار v

من المعادلة(١-٥١) تكون سرعة الانتشار $v=\frac{c}{n}$

حيث تحدد n من المعادلات (١-٥٥) أو (١-٦١) أو (١-٦٦)

$$n=\sqrt{\frac{1}{2}\left[\varepsilon_r+\sqrt{\varepsilon_r^2+(60\lambda\sigma)^2}\right]} \qquad (١-٥٥)$$

١-عندما تكون صفات الوسط نصف الناقل قريبة من صفات الوسط العازل $\varepsilon_r >> 60\lambda\sigma$.

$$n=\sqrt{\varepsilon_r} \qquad (١-٦١)$$

٢-عندما تكون صفات الوسط نصف الناقل قريبة من صفات الوسط النقل $\varepsilon_r << 60\lambda\sigma$.

$$n=\sqrt{30\lambda\sigma} \qquad (١-٦٦)$$

٣- طول الموجة λ'

من المعادلة $\lambda'=\frac{\lambda}{n}$ نحدد طول الموجة في وسط الانتشار. بعد تعويض قيم λ و ε_r و σ في المعادلات السابقة نحصل على القيم المطلوبة بعلاقة طول الموجة في الهواء λ والمدرجة في الجدولين التاليين:

الجدول ١-١ : انتشار الأمواج الكهرطيسية في أرض جافة $\varepsilon_r=4$, $\sigma=0.001[1/\Omega m]$

$\lambda[m]$	$\frac{i_v}{i_l}$	$f[KHz]$	رقم المعادلة	K	$\delta[1/m]$	$X[m]$	n	$V=c/n$ $[m/s]$	$\lambda'=\lambda/n$ $[m]$
20000	3.3×10^{-3}	15	١-٦٩	24.4	7.66×10^{-3}	1800	24.5	1.22×10^{7}	816
2000	3.3×10^{-2}	150	١-٦٩	7.61	2.42×10^{-2}	570	7.75	3.86×10^{7}	256
200	0.33	1.5×10^{3}	١-٥١	2.08	6.54×10^{-2}	210	2.88	1.04×10^{8}	69.5
20	3.3	15×10^{3}	١-٥١	0.7	9.40×10^{-2}	147	2.02	1.48×10^{8}	9.9
2	33	150×10^{3}	١-٦٤	0.03	9.41×10^{-2}	47	2	1.5×10^{8}	1

الجدول ١-٢ : انتشار الأمواج الكهرطيسية في مياه البحر $\varepsilon_r = 80$, $\sigma = 4[1/\Omega m]$

$\lambda[m]$	$\frac{i_v}{i_l}$	$f[KHz]$	رقم المعادلة	K	$\delta\,[1/m]$	$X\,[m]$	n	$V=c/n$ $[m/s]$	$\lambda`=\lambda/n$ [m]
20000	1.66×10^{-5}	15	٦٩-١	1549.2	0.486	28.4	1550	1.93×10^{5}	12.9
2000	1.66×10^{-4}	150	٦٩-١	489.9	1.54	8.96	489	6.13×10^{5}	4.1
200	1.66×10^{-3}	1.5×10^{3}	٦٩-١	154.92	4.86	2.84	155	1.93×10^{6}	1.29
20	1.66×10^{-2}	15×10^{3}	٦٩-١٠	48.9	15.4	0.896	48.9	6.13×10^{6}	0.41
2	0.166	150×10^{3}	٥١-١	15.49	48.6	0.307	16.8	1.78×10^{7}	0.119

مما سبق نستنتج ما يلي:

١- يزداد التخامد في كلا الوسطين بازدياد التردد. لذلك نرى أن الأمواج الطويلة تقطع مسافات أكبر من الأمواج القصيرة قبل أن تتخامد بنفس النسبة.

٢- تتخامد شدة الحقل في مياه البحر ذات الناقلية الجيدة أكثر من تخامدها في الأرض الجافة ذات الناقلية السيئة، إذ يكون التخامد أكبر كلما ازدادت ناقلية الوسط.

٣- عند انتشار الأمواج الكهرطيسية في نصف ناقل تكون سرعة الانتشار v أصغر من سرعة الانتشار في الفضاء الحر c . وتزداد سرعة الانتشار في نصف الناقل بازدياد التردد وتكون سرعة الانتشار في نصف الناقل ذي الناقلية الجيدة أصغر منها في نصف الناقل ذي الناقلية السيئة.

٤- عند انتشار الأمواج الكهرطيسية في نصف ناقل يصبح طول موجتها أقصر من طول موجتها في الفضاء الحر $\lambda' < \lambda$ (التردد لا يتغير طبعاً). ويكون طول الموجة في نصف الناقل ذي الناقلية الجيدة أقصر من طول الموجة في نصف الناقل ذي الناقلية السيئة.

مسألة ١-٢ :

أطلقت نبضة موجة كهرطيسية (λ=20 000 m) من تحت سطح البحر مباشرة إلى عمقه .

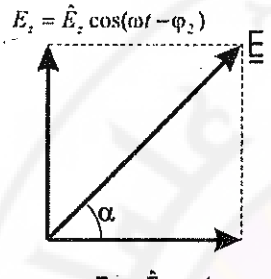
١- احسب الزمن اللازم حتى تعود النبضة إلى مصدرها إذا كان عمق البحر(1000 m) .

٢- احسب طول الموجة و التردد في البحر .

٣- احسب ثابت التخامد δ .

١-٥ استقطاب الأمواج الكهرطيسية

تكون الأمواج الكهرطيسية مستقطبة إذا اتبع اتجاه اهتزاز الشعاع الكهربائي للموجة قانوناً معيناً. وبخلاف الإشعاعات الضوئية التي يمكن أن تكون مستقطبة أو غير مستقطبة نجد أنه من النادر أن تكون الأمواج الكهرطيسية في الحياة العملية غير مستقطبة.



الشكل (١-١١) لدراسة نوع استقطاب الأمواج الكهرطيسية

ونميز ثلاثة أنواع من الاستقطاب :

١- استقطاب مستقيم

٢- استقطاب دائري

٣- استقطاب قطع ناقص

لفهم أنواع الاستقطاب نتصور أنه يوجد في منطقة الاستقبال موجة كهرطيسية لحقلها الكهربائي مركبة E_z عمودية على سطح الأرض ومركبة E_y أفقية بالنسبة لسطح الأرض. ونفترض أن هاتين المركبتين بالرغم من أنهما أشعتا من نفس المشع إلا أنهما اتبعتا طريقين مختلفين للوصول إلى منطقة الاستقبال بحيث أصبح لهاتين المركبتين في منطقة الاستقبال مطالان وزاويتا طور مختلفتان.

آ- الاستقطاب المستقيم

يكون حقل المحصلة مستقطباً استقطاباً مستقيماً إذا كانت زاوية طور المركبة الأفقية وزاوية طور المركبة العمودية للحقل الكهربائي للموجة متساويتين أو مختلفتين بمقدار 180 درجة. فإذا كان في الشكل (١-١١) $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ تصبح مركبتا الحقل الكهربائي:

$$E_y = \hat{E}_y \cos \omega t$$

$$E_z = \hat{E}_z \cos \omega t$$

ويكون طول شعاع المحصلة:

$$E = \sqrt{E_y^2 + E_z^2} = \sqrt{\hat{E}_y^2 + \hat{E}_z^2} \cos \omega t \qquad (١-٧٠)$$

ويحدد اتجاه شعاع المحصلة بالزاوية α التي يشكلها هذا الشعاع مع المحور Y، ويرسم رأس شعاع المحصلة خطاً مستقيماً، حيث:

$$\tan\alpha = \frac{E_z}{E_y} = \frac{\hat{E}_z}{\hat{E}_y} = const. \qquad (٧١-١)$$

تكون الزاوية α في هذه الحالة ثابتة ولا تتغير بتغير الزمن بحيث يحافظ شعاع حقل المحصلة على اتجاهه وهذا ما يسمى تعريفاً الاستقطاب المستقيم.

أما إذا كانت $\varphi_2 = 180^0$ ، $\varphi_1 = 0$ يكون:

$$E_y = \hat{E}_y \cos\omega t$$

$$E_z = \hat{E}_z \cos(\omega t - \pi) = -\hat{E}_z \cos\omega t$$

ويكون طول شعاع المحصلة:

$$E = \sqrt{E_y^2 + E_z^2} = \sqrt{\hat{E}_y^2 + \hat{E}_z^2}\cos\omega t$$

ويحدد اتجاه شعاع المحصلة بالزاوية α التي يشكلها هذا الشعاع مع المحور Y، ويرسم رأس شعاع المحصلة خطاً مستقيماً، حيث:

$$\tan\alpha = \frac{E_z}{E_y} = \frac{-\hat{E}_z}{\hat{E}_y} = -const.$$

نميز في الاستقطاب المستقيم الحالتين الحديتين التاليتين:

الحالة الحدية الأولى: إذا كان لشعاع مستقطب استقطابًا مستقيماً مركبة عمودية فقط ($\alpha = 90°$) نقول إن الموجة مستقطبه عمودياً.

الحالة الحدية الثانية: أما إذا كانت هنالك مركبة أفقية للحقل الكهربائي فقط $(\alpha = 0)$ فتكون الموجة مستقطبة أفقياً.

ب- الاستقطاب الدائري

ينشأ الاستقطاب الدائري للأمواج الكهرطيسية إذا كان مطال المركبة العمودية ومطال الركبة الأفقية متساويين إلا أن زاويتي طورهما مختلفتان بمقدار 90 درجة أو 270 درجة. عندها يدور شعاع المحصلة بعكس أو باتجاه دوران عقارب الساعة، ويرسم رأس هذا الشعاع دائرة. نفترض بأن $\varphi_1 = 0$ و $\alpha_2 = 90°$ (الشكل ١-١١)، بذلك تكون مركبتا الحقل الكهربائي:

$$E_y = \hat{E}\cos\omega t$$

$$E_z = \hat{E}\cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = \hat{E}\sin\omega t$$

$$\hat{E}_y = \hat{E}_z = \hat{E}$$ حيث

ويكون طول شعاع المحصلة:

$$E = \sqrt{E_y^2 + E_z^2} = \hat{E}\sqrt{\cos^2\omega t + \sin^2\omega t} = \hat{E} = const. \qquad (٧٢-١)$$

ويحدد اتجاه دوران شعاع المحصلة بالزاوية α، حيث:

$$\tan\alpha = \frac{E_z}{E_y} = \frac{\sin\omega t}{\cos\omega t} = \tan\omega t \qquad (٧٣-١)$$

بذلك يدور الشعاع باتجاه دوران عقارب الساعة، حيث $\alpha = \omega t$ ، كما هو مبين في الشكل (١-١٢-أ).

أما إذا كانت $\varphi_1 = 0$ و $\alpha_2 = 270°$ فيكون:

$$E_y = \hat{E}\cos\omega t$$

$$E_z = \hat{E}\cos(\omega t - 3\frac{\pi}{2}) = -\hat{E}\sin\omega t$$

ويكون طول شعاع المحصلة:

$$E = \sqrt{E_y^2 + E_z^2} = \hat{E}\sqrt{\cos^2\omega t + (-\sin\omega t)^2} = \hat{E} = const.$$

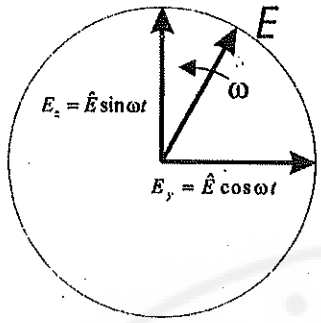
ويكون اتجاه الدوران بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة، حيث:

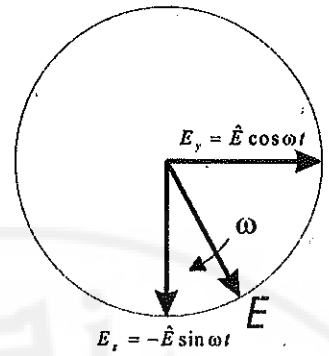
$$\tan\alpha = \frac{E_z}{E_y} = \frac{-\sin\omega t}{\cos\omega t} = -\tan\omega t$$

كما هو مبين في الشكل (١-١٢-ب).

بمقارنة α و E للاستقطاب المستقيم مع α و E للاستقطاب الدائري نرى أنه:

- في الاستقطاب المستقيم يكون اتجاه شعاع المحصلة α ثابتاً بينما يتغير طول الشعاع دورياً.
- في الاستقطاب الدائري يبقى طول شعاع المحصلة ثابتاً بينما تتغير الزاوية α دورياً. يدور شعاع حقل المحصلة بسرعة زاوية قدرها ω، ويرسم رأس الشعاع دائرة. يحدد اتجاه الدوران بالفرق بين زاويتي طور المركبتين، أي إذا كان الفرق 90 أو 270درجة.





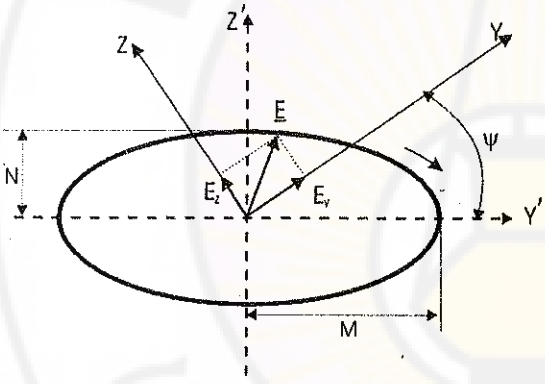
$\varphi_1 = 0 \quad \varphi_2 = 90^o$ $\varphi_1 = 0 \quad \varphi_2 = 270^o$

ب- اتجاه الدوران بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة آ- اتجاه الدوران باتجاه دوران عقارب الساعة

الشكل (١-١٢): الاستقطاب الدائري

ج- استقطاب قطع ناقص

في الحالات العامة، أي عندما يكون مطالا وزاويتا طور مركبتي الحقل الكهربائي للموجة مختلفتين الأولى عن الأخرى، ينشأ استقطاب قطع ناقص، (الشكل١-١٣). للسهولة نفترض بان $\varphi_1 = 0$ ، بذلك تكون مركبتا الحقل الكهربائي:



الشكل (١-١٣): الاستقطاب قطع ناقص

$$E_y = \hat{E}_y \cos\omega t$$

$$E_z = \hat{E}_z \cos(\omega t - \varphi)$$

لتمثيل محصلة هاتين المركبتين بيانياً نستعمل محوري إحداثيات جديدين $Y' - Z'$ يشكلان مع محوري الإحداثيات القديمين $Y - Z$ الزاوية ψ . إذا رمزنا لمركبتي الحقل الكهربائي الجديدتين بـ E'_y و E'_z يكون:

$$\left.\begin{aligned} E_y &= E'_y\cos\psi + E'_z\sin\psi = A\cos\omega t \\ E_z &= E'_y\sin\psi - E'_z\cos\psi = C\cos\omega t - D\sin\omega t \end{aligned}\right\} \qquad (٧٤-١)$$

حيث:

$$A = \hat{E}_y \qquad C = \hat{E}_z\cos\psi \qquad D = \hat{E}_z\sin\psi \qquad (٧٥-١)$$

نحل هاتين المعادلتين بالنسبة للمتغيرين الجديدين E'_y و E'_z فنحصل على:

$$\left.\begin{aligned} E'_y &= (A\cos\psi + C\sin\psi)\cos\omega t + (D\sin\psi)\sin\omega t \\ E'_z &= (C\cos\psi - A\sin\psi)\cos\omega t + (D\cos\psi)\sin\omega t \end{aligned}\right\} \qquad (٧٦-١)$$

يجب الآن اختيار زاوية الدوران ψ بشكل نستطيع معه كتابة هاتين المعادلتين بالشكل التالي:

$$\left.\begin{aligned} E'_y &= M\cos(\omega t - \gamma) \\ E'_z &= N\sin(\omega t - \gamma) \end{aligned}\right\} \qquad (٧٧-١)$$

حيث:

$$\left.\begin{aligned} A\cos\psi + C\sin\psi &= M\cos\gamma \\ D\sin\psi &= M\sin\gamma \end{aligned}\right\} \qquad (٧٨-١)$$

$$\left.\begin{aligned} C\cos\psi - A\sin\psi &= -N\sin\gamma \\ D\cos\psi &= N\cos\gamma \end{aligned}\right\} \qquad (٧٩-١)$$

من المعادلتين (١-٧٨) نحصل :

$$\tan\gamma = \frac{D\sin\psi}{A\cos\psi + C\sin\psi}$$

ومن المعادلتين(١-٧٩) نحصل :

$$\tan\gamma = -\frac{C\cos\psi - A\sin\psi}{D\cos\psi}$$

بمساواة هاتين المعادلتين وحل المعادلة الجديدة بالنسبة للزاوية ψ نحصل :

$$\tan 2\psi = \frac{2AC}{A^2 - C^2 - D^2} \qquad (٨٠-١)$$

تظهر المعادلة (١-٨٠) بأنه عند اختيار قيمة الزاوية ψ بشكل صحيح يمكن تحديد قيمتي مركبتي الحقل الكهربائي للموجة على المحورين الجديدين $Y'-Z'$ بواسطة المعادلتين (١-٧٧). من هاتين المعادلتين نحصل:

$$\frac{E_y'^2}{M^2}+\frac{E_z'^2}{N^2}=1 \qquad (١-٨١)$$

وهذه المعادلة هي المعادلة الأساسية للقطع الناقص نصف قطره الكبير M و نصف قطره الصغير N.

تحدد قيمتا M و N من المعادلات (١-٧٨) و (١-٧٩) بحيث نحصل:

$$\left.\begin{aligned} M &= \sqrt{\left(A\cos\psi + C\sin\psi\right)^2 + D^2\sin^2\psi} \\ N &= \sqrt{\left(C\cos\psi - A\sin\psi\right)^2 + D^2\cos^2\psi} \end{aligned}\right\} \qquad (١-٨٢)$$

وتحدد قيمة الزاوية ψ من المعادلة (١-٨٠).

بناءً على ما سبق تكون الموجة الكهرطيسية مستقطبة استقطاب قطع ناقص، ويدور شعاع محصلة الحقل الكهربائي، ويرسم رأس الشعاع قطعاً ناقصاً يصنع نصف قطره الكبير مع المحور Y الزاوية ψ (الشكل ١-١٣)، ويحدد اتجاه دوران الشعاع بقيمة وإشارة زاوية الطور φ.

إذا تساوى نصفا قطر موجة مستقطبة استقطاب قطع ناقص يتحول الاستقطاب إلى استقطاب دائري.

أما إذا أصبح القطر الصغير للموجة المستقطبة استقطاب قطع ناقص لا متناهياً في الصغر يتحول الاستقطاب إلى استقطاب مستقيم.

بعكس شعاع المحصلة في الاستقطاب الدائري يدور شعاع المحصلة في الاستقطاب قطع ناقص بشكل غير منتظم. فإذا رمزنا للزاوية المشكلة بين شعاع المحصلة والمحور Y' في لحظة ما بـ α، تكون:

$$\tan\alpha = \frac{E_z'}{E_y'} = \frac{N}{M}\tan\left(\omega t-\gamma\right)$$

منه ينتج :

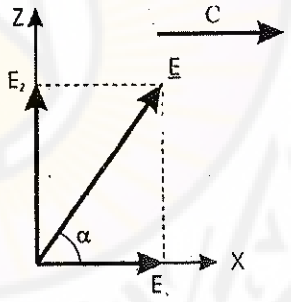
$$\alpha = arc.\tan\left[\frac{N}{M}\tan(\omega t - \gamma)\right] \qquad (٨٣-١)$$

ويمكن إثبات دوران شعاع المحصلة في الاستقطاب قطع ناقص بشكل غير منتظم باشتقاق هذه المعادلة بالنسبة للزمن حيث تكون $\frac{d\alpha}{dt}$ ثابتة فقط عندما يكون $N = M$ ، وهي حالة الاستقطاب الدائري.

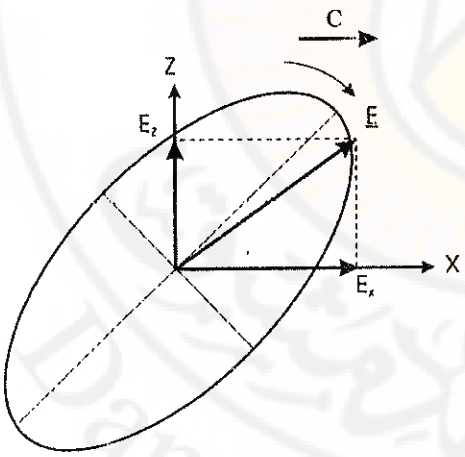
د- استقطاب الأمواج الكهرطيسية في اتجاه الانتشار

عند انتشار الأمواج الكهرطيسية في وسط متجانس تستطيع مركبات الحقل أن تتواجد فقط بشكل عمودي على اتجاه الانتشار. أما عند الانتشار في وسط غير متجانس فيمكن في بعض الحالات أن تنشأ مركبة طولانية للحقل الكهربائي. ويمكن أن تتفق زاوية طور المركبة الطولانية مع زاوية طور المركبة العرضانية أو تختلف عنها بمقدار زاوية معينة.

في الحالة الأولى يكون شعاع محصلة الحقل الكهربائي مائلاً بمقدار زاوية معينة α بالنسبة لاتجاه الانتشار، ولا تتغير هذه الزاوية بمرور الزمن كما يبين الشكل (١-١٤).



الشكل(١-١٤)ميلان شعاع المحصلة الكهربائية بالنسبة لاتجاه الانتشار.



الشكل(١-١٥) استقطاب قطع ناقص باتجاه الانتشار.

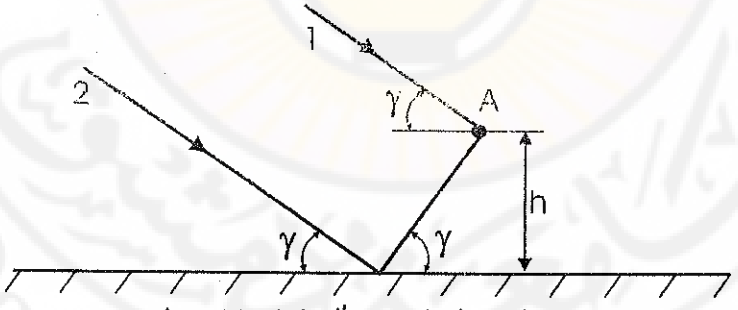
في الحالة الثانية يغير شعاع محصلة الحقل الكهربائي اتجاهه باستمرار، ويرسم رأس الشعاع قطعاً ناقصاً كما يبين الشكل (١-١٥).

في هذه الحالة نسمي الاستقطاب استقطاب قطع ناقص للموجة في اتجاه الانتشار. وتستعمل المعادلات المشتقة في البند السابق لحساب قيم القطع الناقص.

١-٦ انعكاس الأمواج الكهرطيسية على سطح الأرض

عند مناقشة حوادث انتشار الأمواج القصيرة جداً يجب غالباً مراعاة الانعكاس على سطح الأرض. مثال على ذلك الشكل (١-١٦) حيث يرد إلى هوائي موجود في النقطة A على ارتفاع h من سطح الأرض شعاع كهرطيسي يشكل مع سطح الأرض الزاوية γ (شعاع مباشر). وبما أن الموجة المستوية تتألف من عدد لانهائي من الأشعة المتوازية يمكن أن يصل أيضاً شعاع آخر من هذه الأشعة (الشعاع المرموز له بـ 2 في الشكل ١-١٦) إلى النقطة A نتيجة انعكاسه على سطح الأرض. وينجم الحقل الكلي في النقطة A عن تداخل الشعاع المباشر والشعاع المنعكس على سطح الأرض (الشعاع غير المباشر).

مما سبق تتوضح ضرورة حساب شدة حقل و زاوية طور الشعاع المنعكس على سطح الأرض. وهذا يقودنا إلى عامل انعكاس عقدي يراعي تغير المطال وزاوية الطور أثناء حادثة الانعكاس.



الشكل (١-١٦) : لتوضيح تأثير شعاع منعكس على سطح الأرض في تحديد محصلة الحقل في النقطة A.

ويمكن صياغة المشكلة المراد مناقشتها كما يلي:

على سطح حدي (سطح فاصل) مستوي بين الهواء ونصف ناقل يرد شعاع بزاوية ورود φ

شدة حقله معروفة واستقطابه عمودي أو أفقي. والمطلوب تحديد:

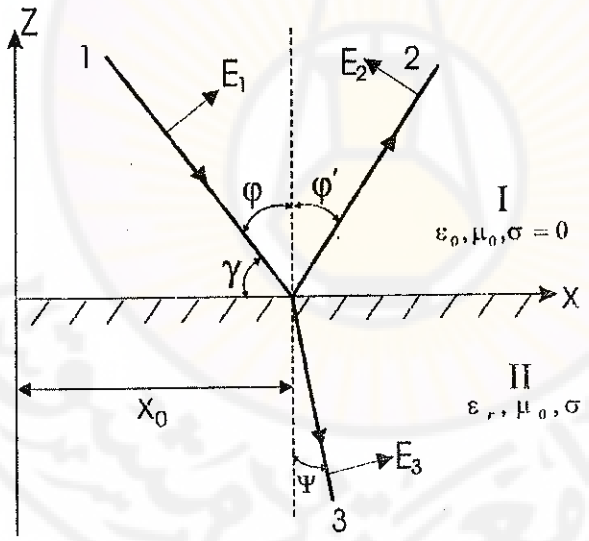
١- اتجاه الشعاع المنعكس

٢- شدة حقله

٣- زاوية طوره

ويبين الشكل (١-١٧) توضيح بياني لذلك.

الوسط الواقع فوق السطح الحدي المهشر هو الهواء، ونعتبره عازلاً كهربائياً مثالياً قيمه الكهربائية هي ε_0 و μ_0. والوسط الواقع تحت السطح الحدي هو نصف ناقل قيمه الكهربائية هي σ و ε و μ_0 . و بما أننا نفترض بأن الوسطين في كلا طرفي السطح الحدي هما وسطان نظريان ومتجانسان يكون اتجاه شعاعي الحقل الكهربائي و الحقل المغناطيسي عمودياً على اتجاه الانتشار. لحلل الشعاع الوارد على السطح الحدي (1) والذي يشكل الزاوية φ مع الشاقول إلى شعاعين ، شعاع منعكس يشكل الزاوية φ' مع الشاقول (2) وشعاع منكسر يشكل الزاوية ψ مع الشاقول (3).



الشكل (١-١٧): انعكاس وانكسار موجة مستقطبة عمودياً على السطح الحدي بين وسطين

نحدد الآن محاور الإحداثيات بشكل يكون فيه المحور Z عمودياً على السطح الحدي بين الوسطين، أي على المستوي X-Y ، ونحدد إحداثيات نقطة ورود الشعاع (1) بـ X_0 .

رأينا في بحث استقطاب الأمواج الكهرطيسية (المقطع ١-٥) أنه يمكن اعتبار أي استقطاب للشعاع الوارد محصلة لمركبتين إحداهما مستقطبة عمودياً وأخرى مستقطبة أفقياً. عند معرفة قوانين انعكاس الأشعة المستقطبة عمودياً وأفقياً نستطيع حسب مبدأ التراكم اشتقاق قانون انعكاس شعاع له أي استقطاب آخر. انطلاقاً من هذا المبدأ سنحدد الآن فقط قوانين انعكاس الأشعة المستقطبة أفقياً وعمودياً.

يهتز شعاع الحقل الكهربائي للموجة المستقطبة عمودياً في المستوي X-Z ، ويهتز شعاع الحقل الكهربائي للموجة المستقطبة أفقياً في مستو مواز للمستوي X-Y . نرمز للاستقطاب العمودي بالدليل V وللاستقطاب الأفقي بالدليل h . نرمز للشعاع الوارد بالدليل(1) وللشعاع المنعكس بالدليل (2) وللشعاع المنكسر بالدليل (3) كما هو مبين بالشكل (١-١٧).

نرمز للمسافات (التي تقطعها الأشعة) من نقطة الورود في الاتجاهات (1) و (2) و(3) بالأحرف l_1 و l_2 و l_3 .

بذلك نحصل على المعادلات التالية للموجة الواردة والموجة المنعكسة والموجة المنكسرة:

$$\left.\begin{aligned} \underline{E}_{1V} &= \hat{\underline{E}}_{1V}\cdot e^{j\omega(t+\frac{l_1}{C})} \\ \underline{E}_{2V} &= \hat{\underline{E}}_{2V}\cdot e^{j\omega(t-\frac{l_2}{C})} \\ \hat{\underline{E}}_{3V} &= \hat{\underline{E}}_{3V}\cdot e^{j\omega(t-\frac{l_3\sqrt{\varepsilon_{kr}}}{C})} \end{aligned}\right\} \qquad (\text{١-٨٤})$$

من الشكل (١-١٧) نحدد المسافات l_1 و l_2 و l_3 كما يلي:

$$\left.\begin{aligned} l_1 &= (X_0 - X)\sin\varphi + Z\cos\varphi \\ l_2 &= (X - X_0)\sin\varphi' + Z\cos\varphi' \\ l_3 &= (X - X_0)\sin\psi - Z\cos\psi \end{aligned}\right\} \qquad (\text{١-٨٥})$$

افترضنا في المعادلات (١-٨٥) أن سرعة انتشار الأمواج الكهرطيسية في الوسط الأول (الهواء) مساوية لسرعة انتشار الضوء في الفراغ $v = c$. في الوسط الثاني يجب استبدال سرعة الانتشار بالتعبير العقدي التالي $v = \dfrac{c}{\sqrt{\varepsilon_{kr}}}$.

إن اشتقاق معادلات شدة الحقل للشعاع المنعكس والشعاع المنكسر يعتمد على الشروط الحدية التالية، والتي يجب أن تتحقق في كل نقطة من نقاط السطح الحدي بين الوسطين:

آ- يجب أن يكون سلوك (تغير) المركبات المماسية لشدة الحقل الكهربائي وشدة الحقل المغناطيسي عند الانتقال خلال السطح الحدي (أي عند $Z=0$) بين الوسطين I و II مستمر (أي لا يوجد تغير مفاجئ).

ب- يجب أن يكون جداء المركبات العمودية للحقل الكهربائي بثابت العازلية الكهربائية وللحقل المغناطيسي بثابت النفوذية المغناطيسية في كلا الوسطين I و II (عند $Z=0$) متساوي.

ويمكننا صياغة هذه الشروط بشكل رياضي كما يلي :

$$\left.\begin{aligned} E_{I\,\tan} &= E_{II\,\tan} \\ H_{I\,\tan} &= H_{II\,\tan} \end{aligned}\right\} \quad Z=0 \qquad (٨٦-١)$$

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{rI} \cdot E_{I norm.} &= \varepsilon_{krII} \cdot E_{II norm} \\ \mu_{rI} \cdot H_{I norm.} &= \mu_{rII} \cdot H_{II norm.} \end{aligned}\right\} \quad Z=0 \qquad (٨٧-١)$$

<u>الحالة الأولى : شعاع مستقطب عمودياً</u>

انطلاقاً من الفرضية بأن أشعة الحقل الكهربائي الواردة والمنعكسة والمنكسرة للموجة الكهرطيسية لها في لحظة معينة الاتجاهات المبينة في الشكل(١-١٧) وبناء على الشرطين الحديين (١-٨٦) يمكننا كتابة المعادلة التالية عند $Z=0$.

$$\underline{E}_{1V}\cos\varphi - \underline{E}_{2V}\cos\varphi' = \underline{E}_{3V}\cos\psi \qquad (٨٨-١)$$

بتعويض قيم $\underline{E}_{1V}$ و $\underline{E}_{2V}$ و $\underline{E}_{3V}$ من المعادلات (١-٨٤) و قيم l_1 وl_2 و l_3 من المعادلات (١-٨٥) في المعادلة (١-٨٨) نحصل :

$$\hat{\underline{E}}_{1v} e^{j\omega\left[t-\frac{(X-X_0)\sin\varphi}{c}\right]}\cos\varphi - \hat{\underline{E}}_{2v} e^{j\omega\left[t-\frac{(X-X_0)\sin\varphi'}{c}\right]}\cos\varphi' = \qquad (٨٩-١)$$
$$= \hat{\underline{E}}_{3v} e^{j\omega\left[t-\frac{(X-X_0)\sin\psi\cdot\sqrt{\varepsilon_{kr}}}{c}\right]}\cos\psi$$

وبما أن الشرطين الحديين (١-٨٦) يتحققان عند السطح الحدي $Z=0$ فقط لذلك عوضت قيم L من المعادلات (١-٨٥) لقيمة $Z=0$. باختصار $e^{j\omega t}$ في المعادلة (١-٨٩) نحصل:

$$\hat{\underline{E}}_{1v} e^{-j\frac{\omega}{c}(X-X_0)\sin\varphi}\cos\varphi - \hat{\underline{E}}_{2v} e^{-j\frac{\omega}{c}(X-X_0)\sin\varphi'}\cos\varphi' \qquad (٩٠-١)$$
$$= \hat{\underline{E}}_{3v} e^{-j\frac{\omega}{c}(X-X_0)\sqrt{\varepsilon_{kr}}\sin\psi}\cos\psi$$

بتعويض $X=X_0$ في المعادلة (١-٩٠) نحصل على المعادلة التالية لنقطة الانعكاس :

$$\underline{\hat{E}}_{1v}\cos\varphi - \underline{\hat{E}}_{2v}\cos\varphi' = \underline{\hat{E}}_{3v}\cos\psi \qquad (١-٩١)$$

ويجب أن تتحقق المعادلة (١-٩٠) في كل نقطة من نقاط السطح الحدي، أي من أجل أي قيمة من قيم الإحداثي X . ولا يتحقق هذا الشرط إلا إذا كانت الأسس الثلاثة متساوية بعضها مع بعض، أي عندما يتحقق الشرط.

$$\sin\varphi = \sin\varphi' = \sqrt{\varepsilon_{kr}}\sin\psi \qquad (١-٩٢)$$

ومنه يكون أولاً:

$$\varphi = \varphi' \qquad (١-٩٣)$$

وهذا يكافئ القاعدة المعروفة في علم الضوء والقائلة إن زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس.

ومن المعادلة (١-٩٢) يكون أيضاً:

$$\sin\varphi = \sqrt{\varepsilon_{kr}}\sin\psi = \sqrt{\varepsilon_r - j60\lambda\sigma}\sin\psi \qquad (١-٩٤)$$

وبما أن زاوية الورود ذات قيمة حقيقية دائماً نتوصل إلى النتيجة غير المنطقية وهي أن المعادلة (١-٩٤) يمكن أن تتحقق فقط عندما يكون $\sin\psi$ قيمة عقدية.

هذا يعني أن السطوح المشكلة من زوايا الطور المتساوية لا تنطبق مع السطوح المشكلة من المطالات المتساوية في الموجة المنكسرة، حيث إنه عند الانعكاس على سطح نصف ناقل لا تكون الموجة المنكسرة موجة مستوية (كما عرفناها سابقاً).

إذا عرفنا اتجاه الانتشار بالعمود على السطح المشكل من زوايا طور الاهتزاز المتساوية نستطيع تحديد اتجاه انتشار الموجة المنكسرة. نعوض في المعادلة (١-٩٤) قيمة $\sqrt{\varepsilon_{kr}}$ من المعادلة $\sqrt{\varepsilon_{kr}} = n - jk$ فنحصل :

$$\sin\varphi = n\sin\psi - jk\sin\psi \qquad (١-٩٥)$$

ومن هذه المعادلة العقدية يكون :

$$\left.\begin{aligned} 1\cdot\sin\varphi &= n\sin\psi \\ 0 &= k\sin\psi \end{aligned}\right\} \qquad (١-٩٦)$$

تحدد المعادلة الأولى اتجاه انتشار الموجة المنكسرة وتتطابق مع قانون الانكسار الموضوع من قبل "Snellius" والمعروف في علم الضوء. وإذا كان الوسط الثاني عازلاً كهربائياً مثالياً ذا ثابت عازلية كهربائية ε_r يمكن كتابة المعادلة الأولى من المعادلتين (١-٩٦) ،

(بتطبيق المعادلة ١- ٩٤) بالشكل الاعتيادي التالي :

$$\sin\varphi = \sqrt{\varepsilon_r}\,\sin\psi \qquad (٩٧-١)$$

وتصبح في هذه الحالة $k = 0$ ، وتتحقق المعادلة الثانية من المعادلتين (١-٩٦) لنفس قيمة زاوية الانكسار. هذا يعني أن السطح المشكل من زوايا الطور المتساوية في هذه الموجة هو نفس السطح المشكل من المطالات المتساوية.

أما إذا كان الوسط الثاني نصف ناقل لا يساوي فيه الحد k الصفر يمكن اعتبار المعادلة الثانية من المعادلتين (١-٩٦) المعادلة التي تحدد اتجاه العمود على السطح المشكل من المطالات المتساوية.

وتتحقق المعادلة الثانية فقط إذا كانت $\psi = 0$ ، ويعني هذا الشرط أن السطوح المشكلة من المطالات المتساوية للموجة المنكسرة تكون موازية للسطح الحدي. ويجب أن لا تكون هذه النتيجة مفاجئة لأنه كلما اخترقت الموجة الأرض إلى عمق أكبر انخفضت شدة حقل الموجة المنكسرة أكثر وبدون أن يتعلق هذا الانخفاض في شدة الحقل بالإحداثي X .

منه نرى أن المعادلة (١-٩٣) والمعادلة (١-٩٦) تحددان اتجاه الموجة المنعكسة والمنكسرة.

لتحديد مطالي الموجة المنعكسة والموجة المنكسرة ننطلق من الشرط الحدي الخاص بالحقل المغناطيسي للموجة (المعادلة الثانية من ١-٨٦).

بما أن أشعة الحقل المغناطيسي عمودية على أشعة الحقل الكهربائي وعمودية على اتجاه الانتشار نرى أن اتجاه أشعة الحقل المغناطيسي الثلاثة موازية للمحور Y . بتطبيق المعادلة (١-٤٠) نستطيع كتابة هذا الشرط الحدي بالشكل التالي :

$$\frac{1}{120\pi}\left(\underline{E}_{1v} + \underline{E}_{2v}\right) = \frac{\sqrt{\varepsilon_{kr}}}{120\pi}\cdot\underline{E}_{3v} \qquad (٩٨-١)$$

إذا عوضنا $\underline{E}_{1v}$ و $\underline{E}_{2v}$ و $\underline{E}_{3v}$ من المعادلات (١-٨٤) في المعادلة (١-٩٨) وراعينا الشرط المذكور عند مناقشة المعادلة (١-٩٠) نحصل :

$$\hat{\underline{E}}_{1v} + \hat{\underline{E}}_{2v} = \sqrt{\varepsilon_{kr}}\cdot\hat{\underline{E}}_{3v} \qquad (٩٩-١)$$

وبتطبيق المعادلة (١-٩٣) تبسط المعادلة (١-٩٠) وتصبح (أنظر المعادلة ١-٩١):

$$\left(\hat{\underline{E}}_{1v} - \hat{\underline{E}}_{2v}\right)\cos\varphi = \hat{\underline{E}}_{3v}\cos\psi \qquad (١٠٠-١)$$

المعادلة (١-٩٩) و المعادلة (١-١٠٠) هما معادلتان ذات مجهولين، منهما يمكن اشتقاق معادلتي فرنل "Frenel" المشهورتين :

$$\frac{\hat{\underline{E}}_{2v}}{\hat{\underline{E}}_{1v}} = \underline{R}_{2v} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{kr}} \cdot \cos\varphi - \cos\psi}{\sqrt{\varepsilon_{kr}} \cdot \cos\varphi + \cos\psi} \qquad (١٠١-١)$$

$$\frac{\hat{\underline{E}}_{3v}}{\hat{\underline{E}}_{1v}} = \underline{R}_{3v} = \frac{2\cos\varphi}{\sqrt{\varepsilon_{kr}}\cos\varphi + \cos\psi} \qquad (١٠٢-١)$$

تسمى نسبة مطال الشعاع المنعكس إلى مطال الشعاع الوارد " عامل الانعكاس " ، وتسمى نسبة مطال الشعاع المنكسر إلى مطال الشعاع الوارد " عامل الانكسار ". وكلا عامل الانعكاس $\left[\underline{R}_{2v} = R_{2v} \cdot e^{-j\theta_{2v}}\right]$ وعامل الانكسار $\left[\underline{R}_{3v} = R_{3v} \cdot e^{-j\theta_{3v}}\right]$ عدد عقدي. وهذا يدل على أنه خلال الانعكاس والانكسار يتغير مطال شدة الحقل الكهربائي للموجة الواردة ويحدث إنزياح في زاوية طور الموجة المنعكسة والمنكسرة بالنسبة للموجة الواردة. فيما يلي سنهتم فقط بالمعادلة (١٠١-١) والخاصة بالشعاع المنعكس.

يفضل في حسابات انتشار الأمواج الكهرطيسية تحديد اتجاه الشعاع الوارد بزاوية الميل γ وليس بزاوية الورود φ حيث $\gamma + \varphi = 90^\circ$. باستعمال المعادلة (١-٩٢) نستطيع كتابة المعادلة (١-١٠١) بعد إجراء بعض التحويلات بالشكل التالي:

$$\underline{R}_{2v} = \frac{\varepsilon_{kr} \cdot \sin\gamma - \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2\gamma}}{\varepsilon_{kr} \cdot \sin\gamma + \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2\gamma}} \qquad (١٠٣-١)$$

حيث كما ورد سابقاً $\varepsilon_{kr} = \varepsilon_r - j60\lambda\sigma$ ثابت العازلية الكهربائية العقدي النسبي.

انطلاقاً من المعادلة (١-١٠٣) سنناقش الحالات الخاصة التالية فيما يلي:

١- زاوية ميل الشعاع الوارد صغيرة جداً

تمتلك حالات الانتشار حيث زاوية الميل γ صغيرة أهمية خاصة في الحالات العملية من انتشار الأمواج الكهرطيسية فإذا كان :

$$\left|\sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2\gamma}\right| >> \left|\varepsilon_{kr}\right| \sin\gamma \qquad (١٠٤-١)$$

وإذا كانت ناقلية الأرض نهائية ($\sigma \neq \infty$) وكانت زاوية الميل صغيرة أو كان طول الموجة قصير بما فيه الكفاية يمكننا إهمال حد الجمع الأول في صورة ومخرج المعادلة (١-١٠٣) وتصبح:

$$R_{2v} \approx -1 \qquad (١٠٥-١)$$

وتعني هذه القيمة لعامل الانعكاس أنه عند انعكاس موجة مستقطبة عمودياً على سطح الأرض

ترد إليه بزاوية ميل صغيرة يكون مطال الموجة المنعكسة مساوياً لمطال الموجة الواردة بينما تختلف زاوية طور الموجتين بمقدار 180° .

٢- انعكاس أمواج مستقطبة عمودياً على عازل كهربائي مثالي

إذا كانت $\sigma = 0$ يتحول ثابت العازلية الكهربائية العقدي النسبي ε_{kr} إلى قيمة حقيقية ε_r . نعوض هذه القيمة في المعادلة (١-١٠٣) فنحصل:

$$R_{2v} = \frac{\varepsilon_r \cdot \sin\gamma - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\gamma}}{\varepsilon_r \cdot \sin\gamma + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\gamma}} \qquad (١-١٠٦)$$

عندما تكون زاوية الميل صغيرة جداً يمكن إهمال حد الجمع الأول في صورة و مخرج المعادلة (١-١٠٦) وعندها يأخذ عامل الانعكاس القيمة التالية:

$$R_{2v} \approx -1$$

من شكل المعادلة (١-١٠٦) نرى أنه لقيمة زاوية ميل معينه تصبح صورة المعادلة وبذلك عامل الانعكاس مساوياً الصفر، أي عندما يكون :

$$\varepsilon_r \cdot \sin\gamma - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\gamma} = 0$$

ومنه وبعد إجراء بعض التحويلات نحصل :

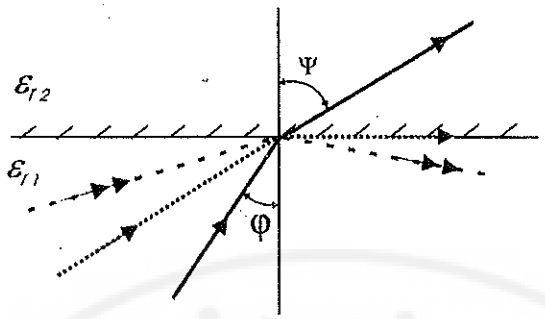
$$\sin\gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon_r}} \qquad (١-١٠٧)$$

لقيمة زاوية الميل γ_0 هذه تخترق كل قدرة الموجة الواردة السطح الحدي إلى الوسط الثاني وتتحول إلى قدرة موجة منكسرة، ولا يحدث أي انعكاس للشعاع الوارد. وتسمى الزاوية γ_0 زاوية " Brewster ".

تمتلك في الحياة العملية ظاهرة الانعكاس الكلي على السطح الفاصل بين عازلين كهربائيين مثاليين معنىً كبيراً. ونلاحظ هذه الظاهرة عند الانتقال من وسط كثيف ضوئياً (أي من وسط ثابت عازليته الكهربائية كبير القيمة) إلى وسط أقل كثافة.

يبين الشكل (١-١٨) حالة انتشار موجة تخترق السطح الحدي إلى وسط رقيق ضوئياً ($\varepsilon_{r1} > \varepsilon_{r2}$) . من المعادلة (١-٩٧) التي تكتب في هذه الحالة بالشكل التالي:

$$\sin\varphi \cdot \sqrt{\varepsilon_{r1}} = \sin\psi \cdot \sqrt{\varepsilon_{r2}} \qquad (١-١٠٨)$$



الشكل(١-١٨): ظاهرة الانعكاس الكلي
على السطح الحدي لوسط رقيق ضوئياً.

منه نرى أنه عندما يكون $\varepsilon_{r1} > \varepsilon_{r2}$ تكون زاوية الانكسار أكبر من زاوية الورود $\psi > \varphi$. ولقيمة موجة معينة لزاوية الورود φ_{cr} تصبح زاوية الانكسار 90°. وينتج ذلك عندما يكون:

$$\sin\varphi_{cr} = \cos\gamma_{cr} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}}} \qquad (١-١٠٩)$$

عندما تصبح زاوية الورود أكبر من ذلك لا يمكن تحقيق المعادلة (١-١٠٨) لأي زاوية من زوايا الانكسار، مما يدل على أنه عندما تكون $\varphi \geq \varphi_{cr}$ تنعكس كل قدرة الموجة من السطح الحدي ولا تخترق أي قدرة هذا السطح إلى الوسط الثاني.

٣- انعكاس أمواج مستقطبة عمودياً على وسط ناقل مثالي

إذا عوضنا في المعادلة (١-٤٦-ب) بـ $\sigma = \infty$ تصبح قيمة ثابت العازلية الكهربائية العقدي $\varepsilon_{kr} = -j\infty$.

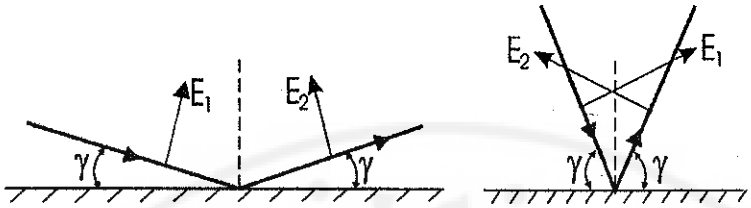
بتعويض قيمة ε_{kr} هذه في المعادلة (١-١٠٣) نرى أن قيمة عامل الانعكاس تصبح :

$$R_{2v} = +1$$

لأي قيمة من قيم زاوية الميل γ (أيضاً عندما تكون γ صغيرة جداً). ذلك يعني أن قدرة الموجة الواردة لا تخترق الوسط الثاني في هذه الحالة نظراً لأن الأمواج الكهرطيسية لا تستطيع الانتشار في وسط ناقل مثالي. وبخلاف الانعكاس على عازل كهربائي مثالي لا تتغير في هذه الحالة زاوية طور الموجة أثناء الانعكاس.

عند ورود الموجة عمودياً على سطح ناقل مثالي، أي عندما تكون $\gamma = 90^\circ$ ، تكون الموجة المنعكسة منزاحة في زاوية الطور عن الموجة الواردة بمقدار 180° على الرغم من أن قيمة

عامل الانعكاس $R_{2v} = +1$. من الشكل(١-١٩) نرى بأنه عند الورود بشكل عمودي يكون اتجاه الشعاع $\underline{E}_2$ بعكس اتجاه الشعاع $\underline{E}_1$.



الشكل (١-١٩): اتجاه الشعاع الكهربائي لموجة مستقطبة عمودياً قبل وبعد الانعكاس على سطح ناقل مثالي

ويظهر الشكل (١-١٩) أوضاع أشعة الحقل الكهربائي لموجة واردة و لموجة منعكسة وذلك عندما يكون الورود بزاوية ميل صغيرة و عندما يكون بزاوية ميل كبيرة.

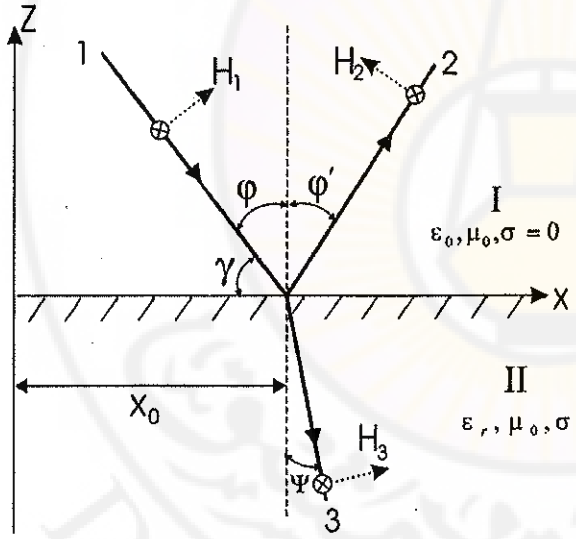
الحالة الثانية: شعاع مستقطب أفقياً

يبين الشكل (١-٢٠) الحالة العامة لانعكاس و انكسار موجة مستقطبة أفقياً. وقد عبر عن أشعة الحقل الكهربائي المبتعدة عن الناظر بالرمز ⊗ . ورسمت أشعة الحقل المغناطيسي للموجة بخطوط منقطة.

من الشرط الحدي الأول(١-٨٦) ولقيمة $Z = 0$ نستطيع أن نكتب:

$$\underline{E}_{1h} + \underline{E}_{2h} = \underline{E}_{3h} \quad (١-١١٠)$$

إذا عوضنا في هذه المعادلة القيم اللحظية لشدة الحقل الكهربائي، واختصرنا الحد $e^{j\omega t}$ وتابعنا العمل الحسابي كما اتبع في المعادلات (١-٩٠) حتى (١-٩٣) نحصل :



الشكل (١-٢٠): انعكاس وانكسار موجة مستقطبة أفقياً على السطح الحدي بين وسطين

$$\underline{\hat{E}}_{1h} + \underline{\hat{E}}_{2h} = \underline{\hat{E}}_{3h} \qquad (١-١١١)$$

للحصول على المعادلة الثانية ننطلق مرة أخرى من الشرط الحدي الأول الخاص بالحقل المغناطيسي للموجة (معادلة ١-٨٦) ونعوض فيه المعادلة (١-٤٠). بعد مراعاة أن اتجاهات أشعة الحقول المغناطيسية في الشكل (١-٢٠) هي تماماً نفس اتجاهات أشعة الحقول الكهربائية في الشكل (١-١٧) نستطيع أن نكتب ما يلي بناءً على المعادلة الثانية (١-٨٦):

$$\frac{\underline{\hat{E}}_{1h}}{120\pi}\cdot\cos\varphi - \frac{\underline{\hat{E}}_{2h}}{120\pi}\cdot\cos\varphi' = \frac{\sqrt{\varepsilon_{kr}}}{120\pi}\cdot\underline{\hat{E}}_{3h}\cdot\cos\psi \qquad (١-١١٢)$$

نحل المعادلتين (١-١١١) و (١-١١٢) بالنسبة للمتغيرين $\underline{\hat{E}}_{2h}$ و $\underline{\hat{E}}_{3h}$ فنحصل:

$$\frac{\underline{\hat{E}}_{2h}}{\underline{\hat{E}}_{1h}} = \underline{R}_{2h} = \frac{\cos\varphi - \sqrt{\varepsilon_{kr}}\cos\psi}{\cos\varphi + \sqrt{\varepsilon_{kr}}\cos\psi} \qquad (١-١١٣)$$

$$\frac{\underline{\hat{E}}_{3h}}{\underline{\hat{E}}_{1h}} = \underline{R}_{3h} = \frac{2\cos\varphi}{\cos\varphi + \sqrt{\varepsilon_{kr}}\cos\psi} \qquad (١-١١٤)$$

وكما ورد سابقاً نسمي $\underline{R}_{2h}$ عامل الانعكاس و $\underline{R}_{3h}$ عامل الانكسار لموجة مستقطبة أفقياً. بالاستعاضة عن زاوية الورود φ بزاوية الميل γ وباستعمال المعادلة (١-٩٢) نستطيع كتابة المعادلة (١-١١٣) بالشكل العملي التالي :

$$\underline{R}_{2h} = \frac{\sin\gamma - \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2\gamma}}{\sin\gamma + \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2\gamma}} \qquad (١-١١٥)$$

بشكل عام يكون ε_{kr} وبذلك $\underline{R}_{2h}$ عدداً عقدياً ($\underline{R}_{2h} = R_{2h}\cdot e^{-j\theta_{2h}}$) مما يدل أنه خلال عملية الانعكاس يتغير مطال شدة الحقل الكهربائي ويحدث انزياح في زاوية طور الموجة المنعكسة بالنسبة للموجة الواردة.

فيما يلي نناقش الحالات الخاصة التالية:

١- زاوية ميل الشعاع الوارد صغيرة جداً

كما ذكرنا سابقاً تمتلك حالات الانتشار حيث زاوية الميل γ صغيرة جداً أهمية خاصة في الحالات العملية لانتشار الأمواج الكهرطيسية. وإذا كانت ناقلية الأرض نهائية ($\sigma \neq \infty$) وكانت زاوية الميل صغيرة أو كان طول الموجة قصير بما فيه الكفاية تتحقق دائماً المتراجحة التالية:

$$\left|\sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2\gamma}\right| >> \sin\gamma$$

نهمل بناءً على هذه المتراجحة حد الجمع الأول في صورة و مخرج المعادلة (١-١١٥) فنحصل :

$$\underline{R}_{2h} \approx -1 \qquad (١-١١٦)$$

ويتحقق الشرط $\underline{R}_{2h} \to -1$ بسهولة اكبر من الشرط $\underline{R}_{2v} \to -1$.

تعني هذه القيمة لعامل الانعكاس أنه عند انعكاس موجة مستقطبة أفقياً على سطح الأرض ترد إليه بزاوية ميل صغيرة يكون مطال الموجة المنعكسة مساوياً لمطال الموجة الواردة بينما تختلف زاوية طور الموجتين بمقدار 180° .

٢- انعكاس أمواج مستقطبة أفقياً على عازل كهربائي مثالي

إذا عوضنا في المعادلة (١-١١٥) $\sigma = 0$ و $\varepsilon_{kr} = \varepsilon_r$ نحصل:

$$\underline{R}_{2h} = \frac{\sin\gamma - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\gamma}}{\sin\gamma + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\gamma}} \qquad (١-١١٧)$$

عندما تكون زاوية الميل صغيرة جداً يتناها $\sin\gamma \to 0$ ويأخذ عامل الانعكاس القيمة

$$\underline{R}_{2h} = -1$$

بعكس الأمواج المستقطبة عمودياً (معادلة ١-١٠٦) لا يوجد في حالة الأمواج المستقطبة أفقياً الزاوية γ_0 (انظر المعادلة ١-١٠٧) عند ورود الشعاع عليها تخترق كل قدرة الموجة الواردة السطح الحدي إلى الوسط الثاني ولا يحدث أي انعكاس. السبب هو أنه لا يوجد قيمة لزاوية الميل تحقق الشرط:

$$\sin\gamma - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\gamma} = 0$$

إلا إذا كان الانتقال من الهواء إلى الهواء $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = \varepsilon_r = 1$ ، أي لا يوجد وسطان. وتكون قيم ثابت العازلية الكهربائية النسبي لأي نوع من أنواع العوازل الكهربائية أكبر من الواحد. لذلك لا يأخذ عامل الانعكاس القيمة $\underline{R}_{2h} = 0$ لأي قيمة من قيم زوايا الورود γ .

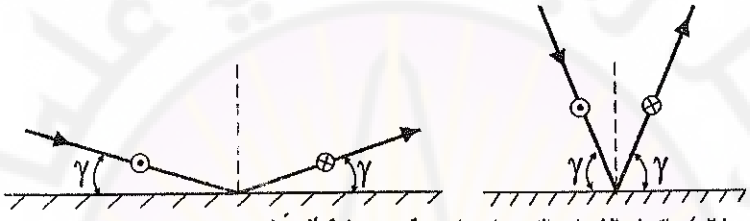
٣- انعكاس أمواج مستقطبة أفقياً على وسط ناقل مثالي

إذا عوضنا بالمعادلة (١-٤٦-ب) بـ $\sigma = \infty$ يصبح $\varepsilon_{kr} = -j\infty$. بتعويض قيمة ε_{kr} هذه في المعادلة (١-١١٥) نرى أن قيمة عامل الانعكاس تأخذ القيمة التالية لأي قيمة من قيم زاوية γ:

$$\underline{R}_{2h} = -1$$

هذه النتيجة بديهية إذا لا تستطيع الأمواج الكهرطيسية الانتشار في وسط ناقل مثالي. وبخلاف الأشعة المستقطبة عمودياً يبقى الاختلاف في زاوية الطور بين الموجة الواردة والموجة المنعكسة 180° مهما كانت قيمة زاوية الميل γ. ويوضح ذلك الشكل (١-٢١)، إذ يبين اتجاهي شعاعي الحقل الكهربائي للموجة الواردة والموجة المنعكسة عندما تكون زاوية الميل صغيرة وعندما يكون ورود الشعاع عمودياً على السطح العاكس.

من مقارنة الموجة المستقطبة عمودياً في الشكل (١-١٩) والموجة المستقطبة أفقياً في الشكل(١-٢١) يتوضح الفرق في سلوك الموجة المستقطبة عمودياً والموجة المستقطبة أفقياً عند الانعكاس على سطح ناقل مثالي.



الشكل (١-٢١): اتجاه الشعاع الكهربائي لموجة مستقطبة أفقياً قبل وبعد الانعكاس على سطح ناقل مثالي.

⊗ شعاع مبتعد عن الناظر ⊙ شعاع مقترب من الناظر

مثال ١- ٣ :

ترد موجة كهرطيسية شدة حقلها E_1 وطول موجتها $\lambda = 200m$ إلى سطح أرض رطبة بزاوية ميل $\gamma = 30^\circ$.

١- احسب قيمة عامل الانعكاس .

٢- احسب شدة حقل الموجة المنعكسة في نقطة الانعكاس فوق سطح الأرض مباشرة ثم احسب محصلة شدة الحقل في نقطة الانعكاس وحدد نوع استقطاب المحصلة. وذلك عندما يكون استقطاب الموجة الواردة:

آ- عمودياً

ب- أفقياً

القيم الكهربائية للأرض الرطبة هي: $\varepsilon_r = 10$, $\sigma = 0.01[1/\Omega m]$

الحل:

١- نحدد أولاً القيم التالية :

$$60\lambda\sigma = 120 \qquad \sin\gamma = 0.5 \qquad \cos\gamma = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2\gamma} = \sqrt{10 - j120 - 0.75} \approx (10 - j120)^{\frac{1}{2}} =$$

$$= (120.4e^{-j85.2^\circ})^{\frac{1}{2}} = 10.97e^{-j42.6^\circ} = 8 - j7.42$$

آ- عامل انعكاس الموجة المستقطبة عمودياً:

من المعادلة (١-١٠٣)

$$\underline{R}_{2v} = \frac{\varepsilon_{kr}\sin\gamma - \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2\gamma}}{\varepsilon_{kr}\sin\gamma + \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2\gamma}} = \frac{5 - j60 - 8 + j7.42}{5 - j60 + 8 - j7.42}$$

$$= \frac{-3 - j52.58}{13 - j67.42} = \frac{3 + j52.58}{-13 + j67.42} = \frac{52.6e^{j86.7}}{68.8e^{j(180-79)}} = 0.766\,e^{-j14.3^\circ}$$

ب- عامل انعكاس الموجة المستقطبة أفقياً:

من المعادلة (١-١١٥)

$$\underline{R}_{2h} = \frac{\sin\gamma - \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2\gamma}}{\sin\gamma + \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2\gamma}} = \frac{0.5 - 8 + j7.42}{0.5 + 8 - j7.42} =$$

$$= \frac{-7.5 + j7.42}{8.5 - j7.42} = \frac{10.54\,e^{j(180-44.69)}}{11.28\,e^{j(360-41.1)}} = 0.93\,e^{-j183^\circ}$$

٢- شدة حقل الموجة المنعكسة ومحصلة شدة الحقل في نقطة الانعكاس

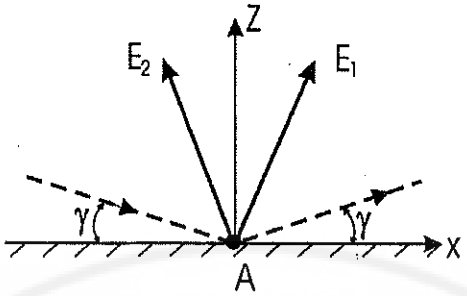
أ- استقطاب الموجة عمودي (الشكل ١-٢٢)

شدة حقل الشعاع الوارد $E_1 = \hat{E}\cos\omega t$

شدة حقل الشعاع المنعكس $E_2 = 0.766\,\hat{E}\cos(\omega t - 14.3)$

من مقارنة هاتين المعادلتين نرى أن حقل المحصلة في نقطة الانعكاس مستقطب استقطاب قطع ناقص.

بإسقاط E_1 و E_2 على المحورين X و Z نحصل على مركبات محصلة شدة الحقل الكهربائي في نقطة الانعكاس.



الشكل (١-٢٢) لتحديد محصلة الحقل في نقطة
الانعكاس A عندما يكون الشعاع الوارد مستقطب عمودياً

$$E_x = E_1\cos 60^\circ - E_2\cos 60^\circ = 0.5\hat{E}\left[\cos\omega t - 0.766\cos\left(\omega t - 14.3^\circ\right)\right]$$

$$E_x = 0.5\hat{E}\left(\cos\omega t - 0.766\cos\omega t\cos 14.3^\circ + 0.766\sin\omega t\sin 14.3^\circ\right)$$

$$E_x = 0.5\hat{E}\left(0.257\cos\omega t + 0.19\sin\omega t\right) = 0.5\cdot 0.257\hat{E}\left(\cos\omega t + \frac{0.19}{0.257}\sin\omega t\right)$$

$$E_x = \frac{0.128}{\cos 36.5^\circ}\hat{E}\left(\cos\omega t + \tan 36.5^\circ\sin\omega t\right) = 0.16\hat{E}\cos\left(\omega t - 36.5^\circ\right)$$

$$E_z = E_1\cos 30^\circ + E_2\cos 30^\circ = 0.866\hat{E}\left[\cos\omega t + 0.766\cos\left(\omega t - 14.3^\circ\right)\right]$$

$$E_z = 0.866\hat{E}\left(\cos\omega t + 0.766\cos\omega t\cos 14.3^\circ + 0.766\sin\omega t\sin 14.3^\circ\right)$$

$$E_z = 0.866\hat{E}\left(1.742\cos\omega t + 0.19\sin\omega t\right) = 1.5\hat{E}\left(\cos\omega t + \tan 6.23^\circ\sin\omega t\right)$$

$$E_z = 1.5\hat{E}\cos\left(\omega t - 6.23^\circ\right)$$

ب- استقطاب الموجة أفقي (الشكل ١-٢٣)

شدة حقل الشعاع الوارد $E_1\cos\omega t$

شدة حقل الشعاع المنعكس $E_2 = 0.93\hat{E}\cos(\omega t - 183^\circ)$

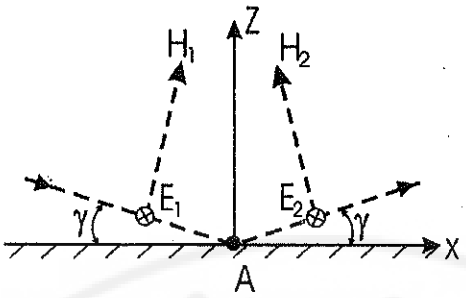
وبما أن كلا شعاعي الحقل الكهربائي متجهان باتجاه المحور Y يكون حقل المحصلة مستقطباً أفقياً .

$$E_y = \hat{E}\cos\omega t + 0.93\cos(\omega t - 183^\circ)$$

$$E_y = \hat{E}\left(\cos\omega t + 0.93\cos\omega t\cos 183^\circ + 0.93\sin\omega t\sin 183^\circ\right)$$

$$E_y = \hat{E}\left(0.071\cos\omega t - 0.048\sin\omega t\right) = 0.071\hat{E}\left(\cos\omega t - \tan 34^\circ\sin\omega t\right)$$

$$E_y = 0.085\hat{E}\cos\left(\omega t + 34^\circ\right)$$



الشكل (١-٢٣) : لتحديد محصلة الحقل في نقطة الانعكاس A عندما يكون استقطاب الشعاع الوارد أفقياً

مسألة ١-٤ :

ترد موجة كهرطيسية حقلها الكهربائي E_1 إلى سطح أرض جافة بزاوية ميل 60°. طول الموجة $200m$.

١- احسب عامل الانعكاس عندما يكون استقطاب الموجة عمودياً وحدد نوع استقطاب محصلة الحقل الكهربائي في نقطة الانعكاس مستعيناً بالرسم.

٢- احسب عامل الانعكاس عندما يكون استقطاب الموجة أفقياً وحدد نوع استقطاب محصلة الحقل الكهربائي في نقطة الانعكاس مستعيناً بالرسم.

٣- احسب القيمة اللحظية لمحصلة الحقل الكهربائي في نقطة الانعكاس عندما يكون استقطاب الموجة أفقياً.

القيم الكهربائية للأرض الجافة هي: $\varepsilon_r = 4$, $\sigma = 0.001[1/\Omega m]$

مسألة ١-٥ :

تنتشر موجة كهرطيسية مستقطبة عمودياً في كل وسط من الأوساط المدرجة في الجدول (١-٣) (أوساط عازلة كهربائياً)، وترد إلى السطح الفاصل بينها وبين الهواء بزاوية ورود φ.

المطلوب تحديد مجال قيمة الزاوية φ لكل وسط تتمكن الموجة ضمنه من عبور السطح الفاصل إلى الهواء.

الجدول ١-٣

نوع الوسط	ε_{r1}
١- ماء مقطر	٨١,١
٢- كحول	٢٥,٨
٣- زجاج كثيف	٩
٤- زجاج قليل الكثافة	٦
٥- مايكا	٦
٦- كوارتز	٥
٧- بترول	٢,١

تحديد عامل الانعكاس بيانياً

تم فيما سبق اشتقاق المعادلتين (١-١٠٣) و (١-١١٥) لحساب عامل الانعكاس $\underline{R}$ من حيث القيمة المطلقة R و الانزياح في زاوية الطور خلال عملية الانعكاس θ وذلك عندما يكون استقطاب الأمواج الكهرطيسية الواردة إلى نقطة الانعكاس عمودياً وأفقياً ، حيث :

$$\underline{R}_{2h} = R_{2h}\, e^{-j\theta_h} \qquad\qquad \underline{R}_{2v} = R_{2v}\, e^{-j\theta_v}$$

من المثال (١-٣) يتبين أن عملية حساب عامل الانعكاس بواسطة المعادلتين (١-١٠٣) و (١-١١٥) صعبة نسبياً .

لتحديد عامل الانعكاس بسهولة أكبر تم وضع ست مجموعات من المنحنيات البيانية المبينة في الأشكال (١-٢٤) حتى (١-٢٩) وذلك لقيم ثابت العازلية الكهربائية النسبي $\varepsilon_r = 4$ و $\varepsilon_r = 10$ و $\varepsilon_r = 80$. وتشمل هذه القيم عملياً جميع أنواع سطح الأرض الموجودة فعلاً .

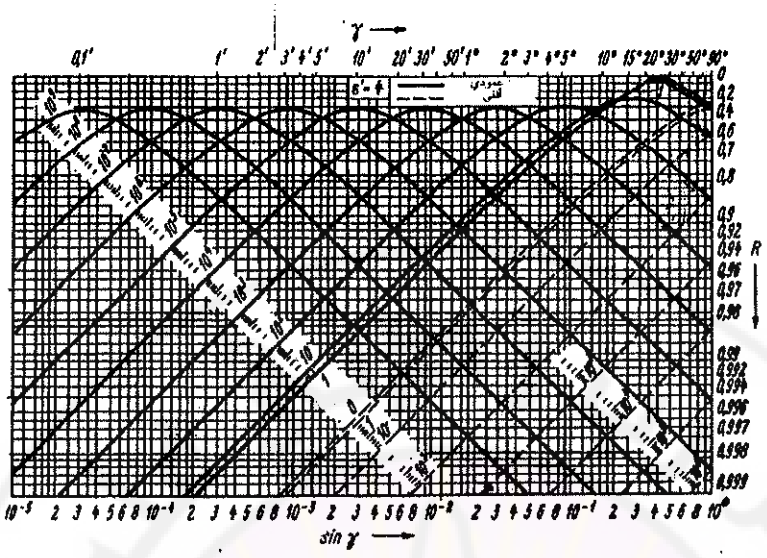
يوجد لكل قيمة من قيم ثابت العازلية الكهربائية النسبي مجموعتا منحنيات بيانية ، من أحدهما يمكن تحديد القيمة المطلقة لعامل الانعكاس R ومن الأخرى يمكن تحديد قيمة الانزياح في زاوية طور الموجة الواردة خلال عملية الانعكاس θ (التأخر في زاوية طور الموجة الواردة).

أدرجت في جميع الأشكال على المحور الأفقي العلوي قيم زاوية الميل γ وعلى المحور الأفقي السفلي قيم $\sin\gamma$ ، وذلك بمقياس رسم لوغاريتمي .

أدرجت في الأشكال (١-٢٤) و (١-٢٦) و (١-٢٨) على المحور العمودي القيم المطلقة لعامل الانعكاس R بمقياس رسم خطي وفي الأشكال (١-٢٥) و (١-٢٧) و (١-٢٩) قيم الزاوية θ بمقياس رسم خطي.

تخص الخطوط المستمرة في مجموعات المنحنيات البيانية الاستقطاب العمودي والخطوط المتقطعة الاستقطاب الأفقي .

رسمت المنحنيات البيانية في كل الأشكال بعلاقة الوسيط $Q = 60\lambda\sigma$.



الشكل (١-٢٤) : القيمة المطلقة لعامل الانعكاس R بعلاقة زاوية الميل γ

ولقيم وسيط مختلفة $Q = 60\lambda\sigma$ ، حيث $\varepsilon_r = 4$

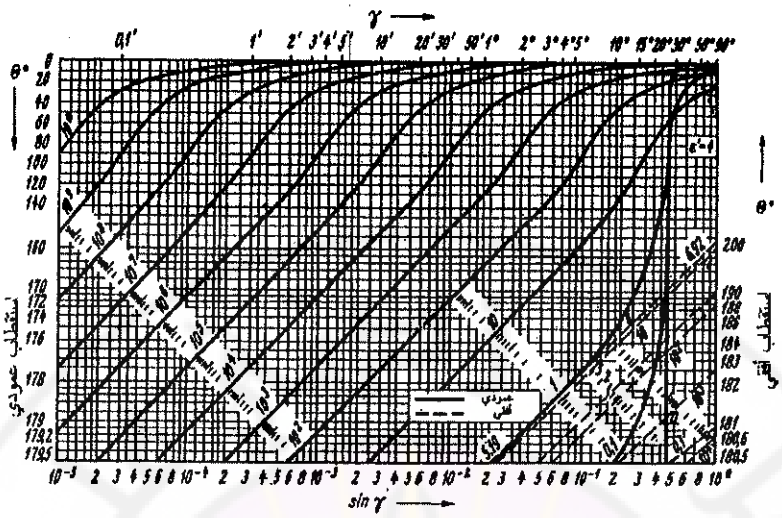
وكما يتبين من مجموعات المنحنيات البيانية يكون الانزياح في زاوية الطور θ في حالة الاستقطاب العمودي دائماً أقل من ١٨٠ درجة ويقترب من ١٨٠ درجة بنقصان طول الموجة أو نقصان ناقلية الأرض . بعكس ذلك في حالة الاستقطاب الأفقي تكون قيمة الزاوية θ دائماً أكبر من ١٨٠ درجة وتقترب من ١٨٠ درجة سواء كانت قيمة الوسيط Q كبيرة أو صغيرة. وبما أن قيمة الزاوية θ في حالة الاستقطاب الأفقي أكبر من ١٨٠ درجة يقال عادة إن زاوية طور الموجة المنعكسة تسبق زاوية طور الموجة الواردة.

لكل قيمة من قيم ثابت العازلية الكهربائية النسبي الثلاثة والمعتمدة في مجموعات المنحنيات يوجد في حالة الاستقطاب الأفقي قيمة محددة للوسيط Q تأخذ عندها قيمة زاوية التأخير قيمة عظمى. من الأشكال (١-٢٥) و (١-٢٧) و (١-٢٩) يتبين أن هذه القيم العظمى هي:

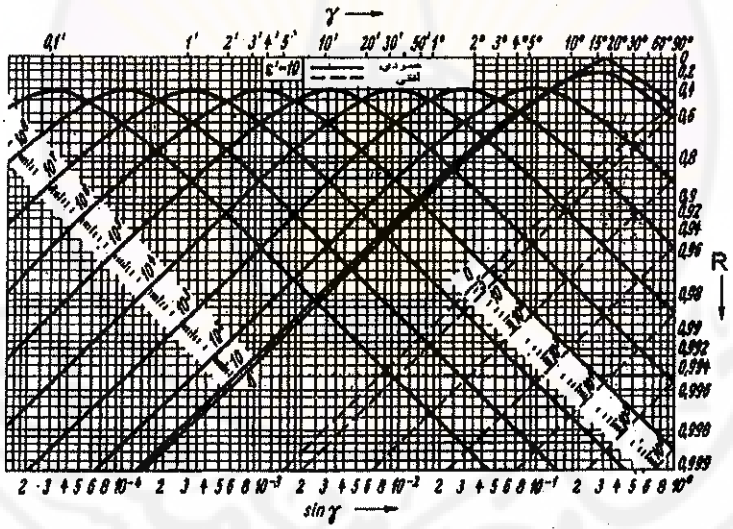
$$\varepsilon_r = 4 \qquad 60\lambda \cdot \sigma = 6$$

$$\varepsilon_r = 10 \qquad 60\lambda \cdot \sigma = 16$$

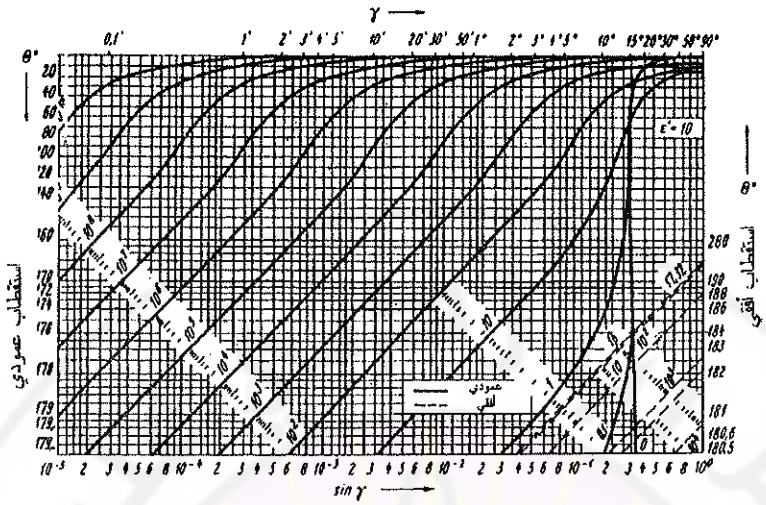
$$\varepsilon_r = 80 \qquad 60\lambda \cdot \sigma = 131$$



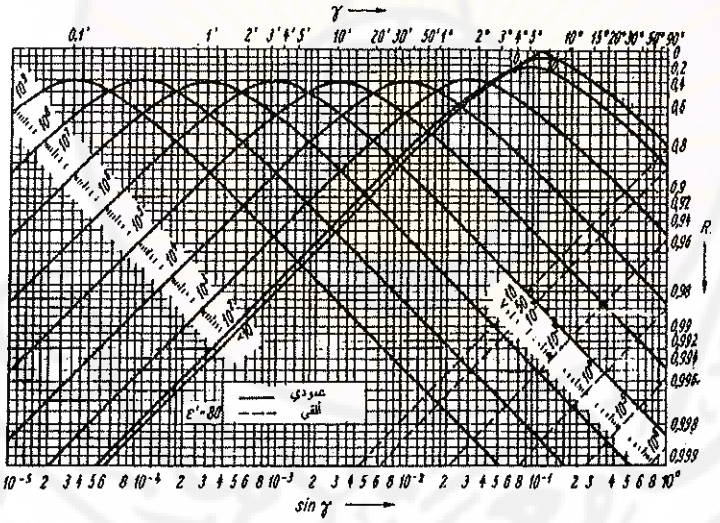
الشكل (١-٢٥) : قيمة الانزياح في زاوية الطور خلال عملية الانعكاس θ بعلاقة زاوية الميل γ ولقيم وسيط مختلفة $Q = 60\lambda\sigma$ ، حيث $\varepsilon_r = 4$



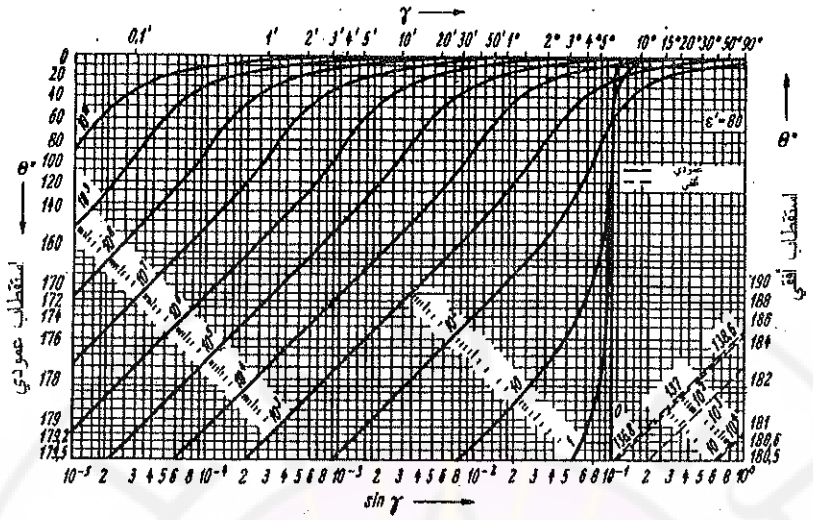
الشكل (١-٢٦) : القيمة المطلقة لعامل الانعكاس R بعلاقة زاوية الميل γ ولقيم وسيط مختلفة $Q = 60\lambda\sigma$ ، حيث $\varepsilon_r = 10$



الشكل (١-٢٧) : قيمة الانزياح في زاوية الطور خلال عملية الانعكاس θ بعلاقة زاوية الميل γ ولقيم وسيط مختلفة $Q = 60\lambda\sigma$ ، حيث $\varepsilon_r = 10$



الشكل (١-٢٨) : القيمة المطلقة لعامل الانعكاس R بعلاقة زاوية الميل γ ولقيم وسيط مختلفة $Q = 60\lambda\sigma$ ، حيث $\varepsilon_r = 80$



الشكل (١-٢٩) : قيمة الانزياح في زاوية الطور خلال عملية الانعكاس θ بعلاقة زاوية الميل γ ولقيم وسيط مختلفة $Q = 60\lambda\sigma$ ، حيث $\varepsilon_r = 80$

مثال ١-٦ :

المطلوب تحديد عامل الانعكاس عندما يكون استقطاب الموجة عمودياً $\underline{R}_{2v}$ وأفقياً $\underline{R}_{2h}$ الذين تم حسابهما في المثال (١-٣) من مجموعات اللوائح البيانية.

الحل:

بما أن قيمة $\varepsilon_r = 10$ نحدد القيمة المطلقة لعامل الانعكاس عندما يكون استقطاب الموجة عمودياً من المنحنيات المرسومة بخطوط مستمرة في الشكل (١-٢٦)، والقيمة المطلقة لعامل الانعكاس عندما يكون استقطاب الموجة أفقياً من المنحنيات المرسومة بخطوط متقطعة في نفس الشكل.

ونحدد قيمة الزاوية θ عندما يكون استقطاب الموجة عمودياً من المنحنيات المرسومة بخطوط مستمرة في الشكل (١-٢٧)، وقيمة الزاوية θ عندما يكون استقطاب الموجة أفقياً من المنحنيات المرسومة بخطوط متقطعة في نفس الشكل .

قيمة الوسيط هي : $Q = 60\lambda \cdot \sigma = 120$

منه نحصل في حالة الاستقطاب العمودي

$$\underline{R}_{2v} = 0.77 \qquad \theta_{2v} = 15^\circ$$

وهما قريبتان جداً من القيمتين المحسوبتين في المثال (١-٣).

ونحصل في حالة الاستقطاب الأفقي .

$$\underline{R}_{2h} = 0.93 \qquad \theta_{2h} = 183^{\circ}$$

وهما نفس القيمتين المحسوبتين في المثال (١-٣).

١-٧ توليد إشعاع ثانوي بواسطة جسم معدني ذي شكل ما

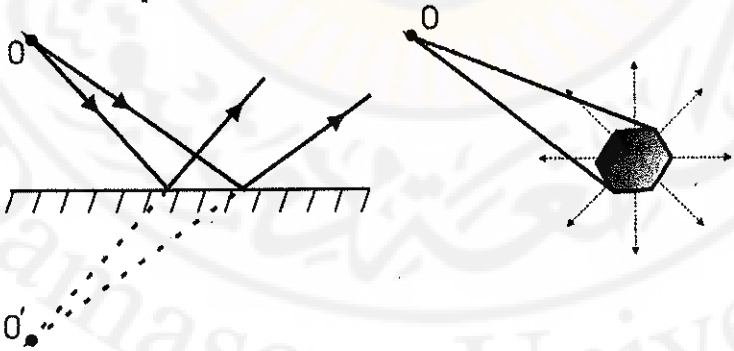
لتوليد إشعاع ثانوي بواسطة أجسام تشع عليها أمواج كهرطيسية معنى كبيراً في خطوط الاتصال اللاسلكي الثانوية المشار إليها في المقطع (١-١) (الشكل ١-٢). وتعتمد طرق عمل بعض أنظمة الملاحة اللاسلكية وطرق عمل أجهزة تحديد الموقع لاسلكياً على هذا المبدأ.

تصبح الأجسام المعدنية ذات المقاييس النهائية الموجودة في حقل موجة كهرطيسية منبعاً لإشعاع ثانوي وتسبب تناثر الأمواج. ويجب هنا التمييز بين أسباب نشوء التناثر وأسباب حدوث الانعكاس. يحدث الانعكاس فقط عندما يكون السطح العاكس مستوياً وكبيراً جداً بالنسبة لطول الموجة. أما إذا كانت مقاييس الجسم صغيرة فتصبح التيارات المتحرضه فيه منبعاً إشعاعياً لأمواج ثانوية تنتشر في جميع اتجاهات الجسم، وسنعالج فيما يلي هذه الحالة.

يوضح الشكل (١-٣٠) الفرق بين انعكاس الأمواج الكهرطيسية وتناثرها.

في حالة الانعكاس (الشكل ١-٣٠-آ) يمكن اعتبار o' المنبع الظاهري للأشعة المنعكسة حيث o' هي خيال منع الإشعاع الحقيقي o بالنسبة للسطح العاكس.

في حالة تناثر الأمواج الكهرطيسية (الشكل ١-٣٠-ب) تذهب الإشعاعات المتولدة من الجسم في جميع الاتجاهات، أي أن منبع الإشعاعات الثانوية يكون في هذه الحالة الجسم نفسه.



ب- تناثر الأمواج الكهرطيسية آ- انعكاس الأمواج الكهرطيسية

الشكل (١-٣٠)

المطلوب في أكثر الحالات العملية هو تحديد شدة حقل الإشعاع الثانوي الناتجة عن جسم ذي شكل معين في منطقة منبع الإشعاع الابتدائي، أي تحديد شدة حقل الإشعاع الثانوي في نقطة إرسال الأمواج الكهرطيسية التي سببت الإشعاع الثانوي. لتسهيل العمليات الرياضية سنعالج فيما يلي فقط الحالة التي تكون فيها مقاييس الجسم كبيرة بالنسبة لطول الموجة، وعندما يكون الجسم ناقلاً مثالياً. وسنفترض أن الجسم موجود في الفضاء الحر وأن تأثير الأجسام الموجودة حوله قابل للإهمال.

بمساعدة المعادلة (١-١) نحدد قيمة شعاع بوينتغ *poynting* في منطقة الجسم الناثر. فإذا كانت درجة توجيه هوائي الإرسال G تحدد المعادلة التالية كثافة تيار القدرة على الجسم الموجود على بعد r من هوائي الإرسال:

$$S = \frac{P \cdot G}{4\pi r^2} \quad [W/m^2] \qquad (١١٨-١)$$

نفترض أيضاً أن الجسم يصبح بتأثير الأمواج الكهرطيسية الواردة عليه منبعاً لإشعاع ثانوي باستطاعة قدرها P' ، وترتبط بكثافة تيار القدرة S بالعلاقة التالية:

$$P' = S \cdot F \qquad [W] \qquad (١١٩-١)$$

للمقدار F بعد السطح، ويحدد صفات الجسم كمشع ثانوي ويسمى " سطح التناثر الفعلي " والمحتوى الفيزيائي للمقدار F هو أنه السطح الذي يشكل ظاهرياً منبعاً لإشعاع الأمواج الثانوية.

يمتلك الإشعاع الثانوي للجسم غالباً صفات التوجيه. بذلك تتعلق القيمة المطلقة لسطح التناثر الفعلي بالاتجاه الذي تنثر فيه الموجة. فيما يلي سنشتق سطح التناثر الفعلي في الاتجاه المعاكس لاتجاه ورود الموجة.

إذا كانت P' استطاعة الإشعاع الثانوي يمكن تحديد القيمة المطلقة لشعاع تيار القدرة الثانوي في منطقة الإرسال الابتدائي بموجب المعادلة:

$$S' = \frac{P'}{4\pi r^2} = \frac{P \cdot G \cdot F}{16\,\pi^2 r^4} \qquad [W/m^2] \qquad (١٢٠-١)$$

وتكون شدة الحقل الإشعاع الثانوي في منطقة الإرسال أي منطقة الإشعاع الابتدائي هي:

$$E' = \frac{\sqrt{30P'}}{r} = \sqrt{\frac{7.5}{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{P \cdot G \cdot F}}{r^2} \qquad [V/m] \qquad (١٢١-١)$$

من المعادلتين (١-١١٩) و (١-١٢٠) نحصل:

$$P' = S \cdot F = 4\pi r^2 S'$$

$$F = 4\pi r^2 \quad \frac{S'}{S} = 4\pi r^2 \quad \left(\frac{E'}{E}\right)^2 \quad [m^2] \qquad (١٢٢-١)$$

حيث E شدة حقل الموجة الواردة في منطقة الجسم الناثر

E' شدة حقل الإشعاع الثانوي في منطقة الإرسال الابتدائي

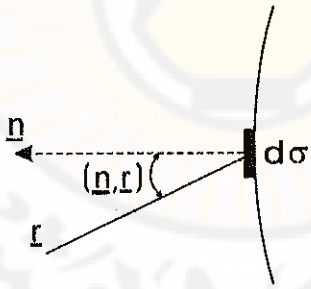
يمكن تحديد النسبة $\left(\frac{E'}{E}\right)$ الموجودة في معادلة سطح التناثر الفعلي بموجب مبدأ "Huygens". لهذا الغرض يفترض أن السطح الخارجي للجسم الناثر مؤلف من أجزاء صغيرة جداً، وأن كل جزء صغير من السطح الخارجي يصبح منبعاً لموجة كروية بسبب حقل الموجة الواردة المؤثرة عليه. إذا جمعنا تأثير هذه الأمواج الكروية الثانوية في نقطة ما نحصل على محصلة حقل الإشعاع الثانوي. من علم الضوء نجد أن حاصل الجمع المشار إليه يمكن التعبير عنه بالتكامل التالي:

$$E' = \frac{1}{\lambda} \iint \frac{E \cdot e^{-j\frac{4\pi \cdot r}{\lambda}}}{r} \cos(\underline{n}, \underline{r}) d\sigma \qquad (١٢٣-١)$$

حيث r المسافة بين منبع الأمواج الكهرطيسية الابتدائي والجسم الناثر.

λ طول الموجة.

$(\underline{n}, \underline{r})$ الزاوية بين اتجاه الانتشار والعمود على الجزء الصغير من السطح(الشكل ١-٣١).



الشكل (١-٣١): لتحديد سطح التناثر الفعلي لجسم ما

وتجرى عملية التكامل على السطح المشع بالأمواج الكهرطيسية من الجسم.

بما أن مقاييس الجسم صغيرة جداً بالنسبة لبعده عن المشع الابتدائي يمكن اعتبار قيمة r في المخرج تحت التكامل قيمة ثابتة. وانطلاقاً من نفس الفكرة يمكن اعتبار شدة الحقل E أيضاً

ثابتة. بذلك تصبح المعادلة (١-١٢٣) بالشكل التالي:

$$\frac{E'}{E}=\frac{1}{\lambda r}\left|\iint e^{-j\frac{4\pi.r}{\lambda}}\cos(\underline{n},\underline{r}).d\sigma\right| \qquad (١-١٢٤)$$

نعوض هذه المعادلة في المعادلة (١-١٢٢) فنحصل:

$$F=\frac{4\pi}{\lambda^2}\left|\iint e^{-j\frac{4\pi.r}{\lambda}}\cos(\underline{n},\underline{r})d\sigma\right|^2 \qquad (١-١٢٥)$$

ونحسب هنا القيمة المطلقة للتكامل نظراً لأن الفرق بين زاويتي طور E و E' لا يؤثر في تحديد قيمة سطح التناثر الفعلي.

بمساعدة المعادلة (١-١٢٥) نحدد الآن سطح التناثر الفعلي لأجسام معدنية ذات أشكال بسيطة.

١- سطح التناثر الفعلي للأجسام المستوية

إذا كان سطح جسم مستو ذي ناقلية مثالية عمودياً على اتجاه انتشار الأمواج الكهرطيسية يمكن اعتبار r تحت إشارة التكامل قيمة ثابتة وبعد مراعاة أن:

$$\left|1\cdot e^{-j\frac{4\pi.r}{\lambda}}\right|=1 \qquad \text{و} \qquad \cos(\underline{n},\underline{r})=1$$

يكون سطح التناثر الفعلي:

$$F=\frac{4\pi}{\lambda^2}\left|\iint d\sigma\right|^2=\frac{4\pi}{\lambda^2}\cdot A^2 \qquad (١-١٢٦)$$

حيث A مساحة السطح الخارجي المستوي.

ويمكن تفسير وجود مربع طول الموجة في مخرج المعادلة (١-١٢٦) بالشكل التالي:

يؤثر السطح المستوي في الوضع المشار إليه أعلاه كهوائي متساوي زوايا الطور ومؤلف من عدد كبير من المشعات الصغيرة جداً. إلا أن أي تعرجات صغيرة نسبياً على السطح يمكن مقارنتها بطول الموجة أو أي انحراف للسطح عن وضعه العمودي على اتجاه الانتشار يسببان انخفاضاً كبيراً في قيمة سطح التناثر الفعلي.

٢- سطح التناثر الفعلي لصفيحة دائرية مستوية قطرها D

إذا شكل الناظم على الصفيحة الدائرية المستوية الزاوية θ مع اتجاه الانتشار تكون معادلة سطح التناثر الفعلي بالشكل التالي:

$$F = \frac{\cot an^2\theta}{\pi \cdot \sin\theta} \cdot \lambda \cdot \frac{D}{2} \cdot \sin\frac{2\pi \cdot D \cdot \sin\theta}{\lambda} - \frac{\pi}{4} \qquad (١٢٧-١)$$

٣- سطح التناثر الفعلي لصفيحة مستطيلة الشكل طولها a و ارتفاعها h

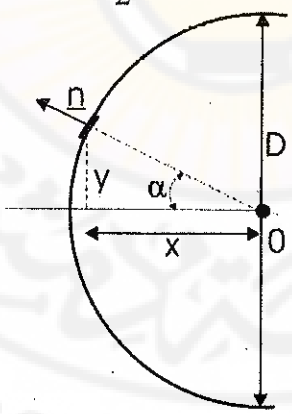
إذا كان السطح المشع مستطيل الشكل وصنع ناظمه الزاوية θ مع اتجاه الانتشار تصبح معادلة سطح التناثر الفعلي بالشكل التالي :

$$F = \frac{4\pi a^2 h^2 \cos^2\theta}{\lambda^2} \left[\frac{\sin\left(\frac{2\pi a \cdot \sin\theta}{\lambda}\right)}{\frac{2\pi a \cdot \sin\theta}{\lambda}} \right]^2 \qquad (١٢٨-١)$$

٤- سطح التناثر الفعلي لكرة معدنية ذات ناقلية مثالية

يبين الشكل (١-٣٢) اتجاه الإشعاع في هذه الحالة. نرمز لقطر الكرة بـ D ونختار وضع محاور الإحداثيات بحيث يكون مركز الإحداثيات في مركز الكرة. بسبب التناظر نختار السطح الصغير $d\sigma$ على شكل خاتم من سطح الكرة نصف قطره $y = \frac{D}{2} \cdot \sin\alpha$ وعرضه $\frac{D}{2} \cdot d\alpha$. وتحدد المعادلة التالية سطح هذا الخاتم:

$$d\sigma = 2\pi \cdot y \cdot \frac{D}{2} \cdot d\alpha = \frac{\pi \cdot D^2}{2} \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha \qquad (١٢٩-١)$$



الشكل (١-٣٢): لتحديد سطح التناثر الفعلي لكرة معدنية

بذلك يمكن استبدال التكامل المضاعف في المعادلة (١-١٢٥) بتكامل بسيط متغيرة α يتغير في الحدود من 0 حتى $\pi/2$. إذا رمزنا للمسافة بين المشع ومركز الكرة بـ r_0، نحصل

من الشكل (١-٣٢):

$$r = r_0 - x = r_0 - \frac{D}{2}\cdot\cos\alpha \qquad (١٣٠-١)$$

نعوض المعادلة (١-١٣٠) في المعادلة (١-١٢٥) فنحصل على:

$$F = \frac{4\pi}{\lambda^2}\left|\iint e^{-j\frac{4\pi r_0}{\lambda}}\cdot e^{j\frac{4\pi D}{2\lambda}\cos\alpha}\cdot\cos\alpha\cdot d\sigma\right|^2 \qquad (١٣١-١)$$

وبما أن : $\left|e^{-j\frac{4\pi r_0}{\lambda}}\right| = 1$ ، و بعد تعويض قيمة $d\sigma$ من المعادلة (١-١٢٩) تصبح المعادلة (١-١٣١) :

$$F = \frac{4\pi}{\lambda^2}\left|\int_0^{\pi/2} e^{j\frac{2\pi D}{\lambda}\cos\alpha}\cdot\frac{\pi D^2}{2}\cos\alpha.\sin\alpha.d\alpha\right|^2 \qquad (١٣٢-١)$$

لسهولة متابعة العمل الحسابي نعوض هنا $z = 2\pi\cdot D/\lambda$ وندخل متغيراً جديداً $w = \cos\alpha$ حيث $dw = sin\alpha\,.\,d\alpha$ فتصبح المعادلة (١-١٣٢):

$$F = \frac{4\pi}{\lambda^2}\frac{\pi^2 D^4}{4}\left|\int_0^1 e^{jzw}\cdot w dw\right|^2 = \frac{\pi^3 D^4}{\lambda^2}\left[\left|\frac{e^{jzw}}{-z^2}(jzw-1)\right|_0^1\right]^2$$

$$= \frac{\pi^3 D^4}{\lambda^2}\left(\frac{e^{jz}}{z^2}(1-jz)-\frac{1}{z^2}\right)^2 \qquad (١٣٣-١)$$

إذا اقتصرنا على معالجة الحالات التي فيها $z >> 1$ نحصل:

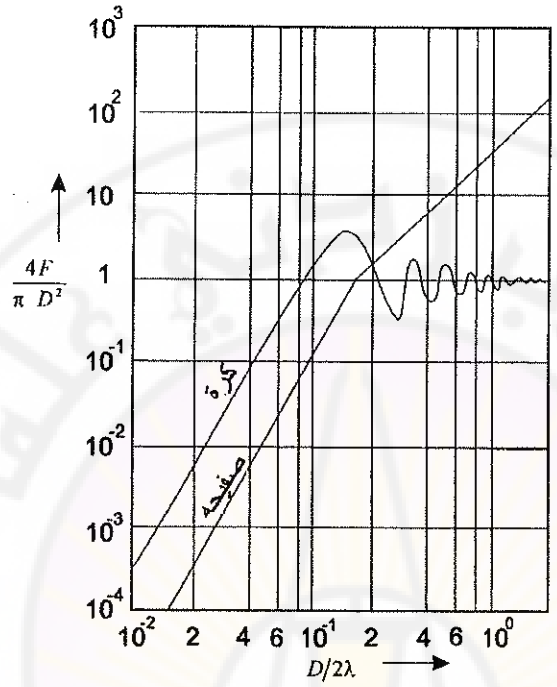
$$F = \frac{\pi^3 D^4}{\lambda^2}\left|\int e^{jzw}\cdot w dw\right|^2 = \frac{\pi^3 D^4}{\lambda^2}\left(\frac{1}{z}\right)^2 = \frac{\pi^3 D^4}{\lambda^2}\left(\frac{\lambda}{2\pi D}\right)^2$$

$$F = \frac{\pi\cdot D^2}{4} \qquad [m^2] \qquad (١٣٤-١)$$

وتظهر المعادلة (١-١٣٤) أن سطح التناثر الفعلي لكرة ذات ناقلية مثالية لا يتعلق بالتردد عندما تكون $D>>\lambda$. ويساوي سطح التناثر الفعلي عددياً السطح المرئي من الكرة.

ويصبح سطح التناثر الفعلي لكرة ذات قطر صغير (كما حسبت من قبل "Rayleigh")، أي عندما يتحقق الشرط $D << \lambda/4\pi$ بالشكل التالي:

$$F = 6.9 \cdot 10^2 \cdot \frac{D^6}{\lambda^4} \quad [m^2] \qquad (١٣٥-١)$$



الشكل (١-٣٣): سطح التناثر الفعلي لكرة ولصفيحة بعلاقة $D/2\lambda$.

وكما يتبين من المعادلة يمتلك سطح التناثر لكرة صغيرة علاقة كبيرة بالتردد. بالنسبة للأجسام التي مقاييسها قريبة من طول الموجة وضع التمثيل البياني الموضح في الشكل (١-٣٣). وقد أدرجت على المحور الأفقي القيم $D/2\lambda$. وأدرجت على المحور العمودي القيم $4F/\pi D^2$. هذه القيم هي سطح التناثر معبراً عنه بأجزاء صغيرة من السطح الخارجي المرئي من الكرة. ويكون المنحني في المجال $D/\lambda = 0.2$ حتى $D/\lambda = 4$ خط متموج لقيم $\frac{F}{\pi D^2/4}$ حيث تتناهى قيمته إلى الواحد بازدياد القيمة $D/2\lambda$.

وتحدد قيم هذا الخط بموجب المعادلة (١-١٣٤). ويمثل المنحني الآخر في الشكل (١-٣٣) سطح التناثر لصفيحة قطرها D موجودة بشكل عمودي على اتجاه انتشار الأمواج الكهرطيسية.

٥- سطح التناثر الفعلي لسطح متموج

إذا أعدنا تطبيق الأفكار المدرجة أعلاه على سطح متموج ذي ناقلية مثالية قطرا انحنائه الرئيسيان ρ_1 و ρ_2 كبيران بالنسبة لطول الموجة، يمكن إثبات أن المعادلة التالية تحدد سطح التناثر الفعلي لمثل هذا الجسم:

$$F = \pi\rho_1\rho_2 \qquad (١٣٦-١)$$

وتمثل هذه المعادلة الشكل المعمم لمعادلة الكرة. وتظهر المعادلة (١-١٣٦) بأن سطح التناثر الفعلي لمثل هذه الحالة لا يتعلق أيضاً بالتردد.

٦- سطح التناثر الفعلي لهوائي دبيول

يفضل عند تولد إشعاع ثانوي من هوائي استقبال تحديد التأثير التناثري للهوائي عن طريق سطح تناثره الفعلي. سنحدد فيما يلي سطح التناثر الفعلي لهوائي موصول بمقاومته الإشعاعية، أي أن مقاومة حمل الهوائي مساوية لمقاومته الإشعاعية. في هذه الحالة تكون الاستطاعة المفيدة المقدمة من قبل الهوائي إلى مقاومة حمله:

$$P_{\max} = \frac{E_{eff}^2 \cdot \lambda^2 \cdot G^2}{480\pi^2} \quad [W] \qquad (١٣٧-١)$$

حيث G درجة توجيه هوائي الاستقبال.

ويعيد الهوائي إشعاع مثل هذه القيمة من الاستطاعة. فإذا كان هوائي الاستقبال خطياً وكان سلكه موازياً لشعاع الحقل الكهربائي للموجة الواردة تكون الاستطاعة المشعة من الهوائي باتجاه جهاز الإرسال P' هي:

$$P' = \frac{E_{eff}^2 \cdot \lambda^2 \cdot G^2}{480\pi^2} \quad [W] \qquad (١٣٨-١)$$

فإذا ساوينا بين استطاعة الإشعاع الثانوي (معادلة ١-١٣٨) وجداء شعاع بوينتنغ (معادلة١-٤) مع سطح التناثر للهوائي نحصل:

$$P' = F \cdot S \qquad S = \frac{E_{eff}^2}{120\pi}$$

$$P' = \frac{E_{eff}^2 \cdot \lambda^2 \cdot G^2}{480\pi^2} = F \cdot \frac{E_{eff}^2}{120\pi} \quad [W] \qquad (١٣٩-١)$$

ومنه يكون:

$$F = \frac{G^2 \cdot \lambda^2}{4\pi} \quad [m^2] \qquad (١٤٠-١)$$

ويكون سطح التناثر الفعلي لهوائي ديبول بطول نصف الموجة $(G = 1.64)$ متوافق أي محمل بمقاومه مساوية لمقاومته الإشعاعية هو:

$$F = 0.22 \cdot \lambda^2 \quad [m^2] \qquad (١٤١-١)$$

وسطح التناثر الفعلي لهوائي قصير جداً معير $(G = 1.5)$ هو:

$$F = 0.18 \cdot \lambda^2 \quad [m^2] \qquad (١٤٢-١)$$

بتعويض قيمة سطح التناثر الفعلي في المعادلة (١-١٢١) نحسب شدة الحقل في منطقة الاستقبال.

مثال ١-٧ :

يشع جهاز إرسال استطاعة قدرها $600Kw$ بتردد قدره $f = 20MHz$ $(\lambda = 1.5cm)$ عن طريق هوائي موجه ربحه $G = 200$. على بعد $r = 8km$ من الهوائي توجد:

١- كرة معدنية قطرها $D = 0.8m$ تقع في مجال إشعاع الهوائي.

٢- صفيحة معدنية مستطيلة طولها $a = 3cm$ وعرضها $b = 1cm$ تقع في مجال إشعاع الهوائي وسطحها عمودي على اتجاه الانتشار.

المطلوب تحديد شدة الحقل الكهربائي الناجمة عن الإشعاع الثانوي للكرة وللصفيحة المعدنية في منطقة الإرسال.

الحل:

١- الكرة المعدنية

بما أن قطر الكرة أكبر بكثير من طول الموجة المشعة يمكن تحديد سطح التناثر الفعلي للكرة بواسطة المعادلة (١-١٣٤):

$$F = \frac{\pi D_{/m}^2}{4} = \frac{\pi 0.64}{4} \approx 0.5 m^2 \qquad , D>>\lambda$$

بتعويض قيم P وG و r و F في المعادلة (١-١٢١) نحصل على شدة الحقل في منطقة الإرسال.

$$E'_{eff} = \frac{\sqrt{30P'}}{r} = \frac{\sqrt{7.5}}{\pi}\frac{\sqrt{P_{/W}\cdot F_{/m^2}\cdot G}}{r^2_{/m}} \quad [V/m]$$

$$E'_{eff} = \frac{\sqrt{7.5}}{\pi}\frac{\sqrt{6\cdot 10^5\cdot 0.5\cdot 200}}{64\cdot 10^6} = 0.187\cdot 10^{-3}\ V/m = 187\ \mu V/m$$

٢- الصفيحة المعدنية

نحدد سطح التناثر الفعلي للصفيحة بواسطة المعادلة (١-١٢٦)

$$F = \frac{4\pi}{\lambda^2_{/m}} A^2_{/m^2} = \frac{4\pi(0.03)^2\cdot(0.01)^2}{(0.015)^2} = 5\cdot 10^{-3} m^2$$

بذلك تكون شدة الحقل في منطقة الإرسال معادلة (١-١٢١) :

$$E'_{eff} = 1.54\frac{\sqrt{6\cdot 10^5\cdot 5\cdot 10^3\cdot 200}}{64\cdot 10^6} = 18\cdot 10^{-6}\ V/m = 18\ \mu V/m$$

١-٨ نظرية التبديل

يمكن تبسيط الكثير من الحسابات في هندسة اللاسلكي بتطبيق ما يسمى نظرية التبديل. وتطبق هذه النظرية في هندسة الكهرباء على الشبكات الخطية بشكل واسع لتسهيل العمل الحسابي . ويمكن تعميم هذه النظرية على حوادث انتشار الأمواج الكهرطيسية شريطة أن يكون الوسط الذي تنتشر فيه الأمواج خطياً و نظرياً . وهنا نذكر أنه يجب منح الجو المتأين صفات الوسط غير النظري بسبب حقل الأرض المغناطيسي وتعرف نظرية التبديل بالشكل التالي :

إن شدة الحقل المنتجة من جهاز إرسال في منطقة الاستقبال لا تتغير إذا تبادل جهاز الإرسال و جهاز الاستقبال مكانيهما .

أما الصياغة الرياضية لهذه النظرية فهي :

نفترض بأنّ لدينا هوائيين مثبتين بشكل ما و طولاهما الفعالان هو l_1 و l_2 و من المهم هنا بأن يكون للوسطين المحيطين بالهوائيين مباشرة نفس الصفات الكهربائية ، و يمكن أن يوجد بين هذين الوسطين عدد ما من الأوساط الخطية النظرية .

فإذا سرى في بطن التيار للهوائي تيار قيمته I_1 و في بطن التيار للهوائي الثاني تيار قيمته I_2 يمكن كتابة العلاقة التالية (الشكل ١-٣٤) :

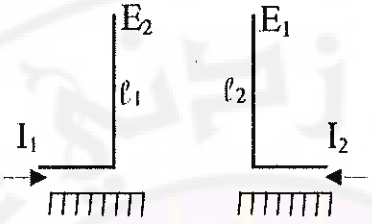
$$l_1 I_1 E_2 = l_2 I_2 E_1 \qquad (١-١٤٣)$$

حيث E_1 شدة الحقل الكهربائي المنتجة من الهوائي الأول عند الهوائي الثاني .

E_2 شدة الحقل الكهربائي المنتجة من الهوائي الثاني عند الهوائي الأول .

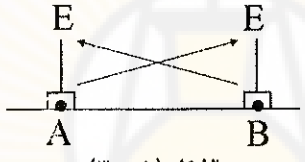
و إذا كان كلا الهوائيين متشابهين ، أي طولاهما الفعالان متساويين و يسري في كل منهما نفس التيار ، ينتج هذان الهوائيان أيضاً نفس شدة الحقل :

$$l_1 = l_2 \qquad I_1 = I_2 \quad \rightarrow E_1 = E_2 \qquad (١٤٤-١)$$



الشكل (١-٣٤)

بكلمات أخرى إذا وضعنا جهاز إرسال مع هوائيه في النقطة A أنتج في النقطة B شدة الحقل E . إذا نقلنا جهاز الإرسال مع هوائيه إلى النقطة B أنتج في النقطة A نفس شدة الحقل E (الشكل ١-٣٥) .



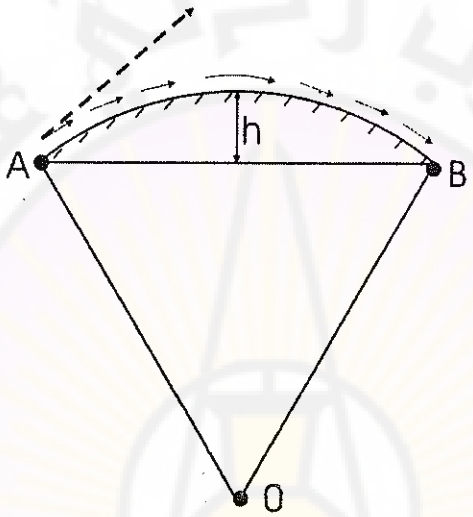
الشكل (١-٣٥)

١-٩ انتشار الأمواج الكهرطيسية حول الكرة الأرضية

تنتشر الأمواج الكهرطيسية في الوسط النظري المتجانس على مسار مستقيم و بسرعة ثابتة وتشذ عن شروط الانتشار هذه على سطح الأرض مباشرة و في طبقات الجو العلوي المتأينة . وتتعرض الأمواج الكهرطيسية على السطح الحدي بين الأرض و الهواء للامتصاص و لتشويه تركيبها ، كما أن مسارها ينحني بسبب انحناء سطح الأرض . ومن المعروف حسب نظرية الانحناء أن هذه الظاهرة تصبح أقوى كلما قربت مقاييس الحاجز الذي يحني مسار الأمواج الكهرطيسية من طول الموجة. في هذه الحالة تعتبر المنطقة الكروية (ارتفاعها h) الواقعة بين منطقة الإرسال A و نقطة الاستقبال B و المبينة في الشكل (١-٣٦) حاجزاً يحني مسار الأمواج الكهرطيسية .

وبما أن ارتفاع الحاجز h أكبر بكثير من طول الأمواج الضوئية لذلك لا يحدث عملياً انحناء لمسار الإشعاعات الضوئية .

أما عند انتشار الأمواج اللاسلكية التي يقاس طول أمواجها بالأمتار وبالكيلومترات فيكون للانحناء على سطح الأرض المنحني معنى كبير لا يمكن إهماله ، ويوضح الشكل (١-٣٦) الحالتين المشار إليهما أعلاه بيانياً .

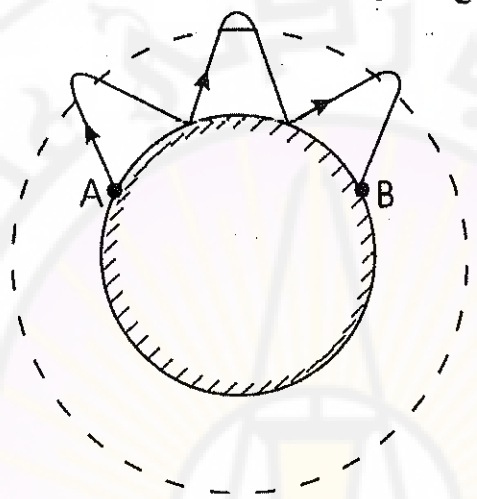


الشكل (١-٣٦): انحناء الأمواج الكهرطيسية حول الكرة الأرضية

بذلك يمكن تفسير التغلب على تحدب سطح الأرض عند انتشار الأمواج الكهرطيسية عن طريق ظاهرة الانحناء . إلا أن إمكانية الانتشار هذه تمكن في أحسن الظروف (عند انتشار الأمواج الطويلة جداً) من اجتياز وتغطية مسافات محدودة لا تتجاوز ٣٠٠٠-٤٠٠٠ كم . ولا تؤدي ظاهرة الانحناء المشار إليها أعلاه أي دور في انتشار الأمواج الكهرطيسية إلى مسافات أكبر ، و تخضع عندها كل حوادث الانتشار لقوانين الانعكاس والانكسار .

تقع المنطقة العاكسة من الجو العلوي المتأين على ارتفاع يتراوح بين ١٠٠-٤٠٠ كم من سطح الأرض . وتظهر عملية حساب بسيطة بأن الأشعة المنعكسة من الجو العلوي تستطيع في هذه الحالة أن تقطع مسافة قصوى قدرها ٤٠٠٠كم فقط بانعكاس واحد (عندما يكون الإشعاع أفقياً). إلا أن الأشعة الواردة إلى سطح الأرض نصف الناقل نتيجة الانعكاس في

طبقات الجو العلوي المتأين تعكس مرة أخرى من سطح الأرض إلى الجو المتأين الذي يعكسها بدوره مرة أخرى إلى سطح الأرض وهكذا. نتيجة الانعكاسات المتعددة هذه في الجو المتأين وعلى سطح الأرض تستطيع الأمواج الكهرطيسية الوصول إلى أي نقطة من نقاط سطح الأرض مهما بعدت عن منطقة الإرسال، وتستطيع أيضاً الدوران حول الكرة الأرضية كلها مرة أو مرات. ويوضح الشكل (١-٣٧) طريقة الانتشار هذه بيانياً والتي تؤدي دوراً خاصاً في انتشار الأمواج القصيرة.



الشكل (١-٣٧): وصول الأمواج الكهرطيسية من A إلى B نتيجة الانعكاسات المتعددة بين الجو المتأين وسطح الأرض.

تسمى الأمواج الكهرطيسية التي تنتشر بالقرب من سطح الأرض مباشرة والتي تتبع انحناء سطح الأرض بفعل تأثير الانحناء " الأمواج الأرضية " وتسمى الأمواج الكهرطيسية التي تنتشر لمسافات بعيدة وتدور حول الكرة الأرضية مرة أو مرات نتيجة الانعكاس المتعدد بين الجو المتأين وسطح الأرض أو أنها تخترق الجو المتأين إلى الفضاء الخارجي " الأمواج السماوية " وبينما يتعلق انتشار الأمواج الأرضية بالحوادث الفيزيائية المتبادلة بين الجو والأرض المنحنية عند السطح الحدي الفاصل بينهما، يتعلق انتشار الأمواج السماوية بالدرجة الأولى بالحوادث الفيزيائية في طبقات الجو العلوي.

يتعلق انتشار الأمواج الأرضية والأمواج السماوية بعوامل متعددة. ونشير فيما يلي إلى أهم هذه العوامل:

بالنسبة للأمواج الأرضية:١- طول خط الاتصال اللاسلكي

٢- ارتفاع ونوع الهوائي المستعمل

٣- طول موجة التشغيل

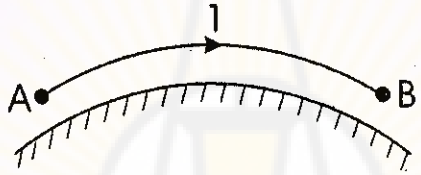
وبالنسبة للأمواج السماوية:١- الإحداثيات الجغرافية لنهايتي خط الاتصال اللاسلكي

٢- أوقات اليوم وفصول السنة

٣- الدورة الإحدى عشرة سنوية لنشاط الشمس

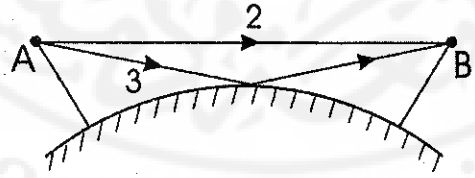
تبين الأشكال التالية حالات مميزه تحدث عند انتشار الأمواج الأرضية، بعضها لمسافات قصيرة أي مسافات لا تتجاوز مدى خط النظر (منسوباً لارتفاع هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال):

١- يوضح الشكل (١-٣٨) حالة الانتشار عندما يكون هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال موجودين على سطح الأرض مباشرة بحيث إن الموجة المنحنية 1 فقط (التي تنتشر على سطح الأرض مباشرة) تصل إلى منطقة الاستقبال B .



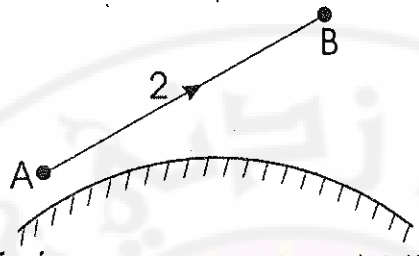
الشكل (١-٣٨): انتشار الموجة الأرضية عندما يكون هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال موجودين على سطح الأرض مباشرة

٢- يوضح الشكل (١-٣٩) حالة الانتشار عندما يكون الهوائيان مرتفعين عن سطح الأرض بحيث تتألف الموجة الأرضية الواصلة إلى منطقة الاستقبال من الموجة المباشرة 2 التي تنتشر انتشاراً حراً في الجو والموجة المنعكسة 3 التي تصل منطقة الاستقبال نتيجة الانعكاس على سطح الأرض.



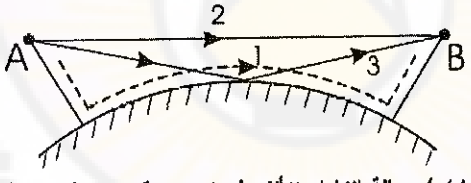
الشكل (١-٣٩): الشعاع المباشر والشعاع المنعكس على سطح الأرض عندما يكون الهوائيان مرتفعين عن سطح الأرض

٣- يبين الشكل (١-٤٠) خط اتصال لاسلكي بين محطة أرضية وجسم طائر. ويؤمن استعمال هوائي إرسال درجة توجيهه عالية تحقيق الاتصال مع الجسم الطائر بواسطة الشعاع 2 الذي ينتشر انتشاراً حراً وعلى مسار مستقيم.



الشكل (١-٤٠): شعاع واحد ينتشر انتشاراً حراً

٤- يبين الشكل (١-٤١) الحالة العامة لانتشار الأمواج الأرضية حيث هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال موجودان على ارتفاع ليس بالكبير من سطح الأرض. في هذه الحالة لا ينحصر تأثير الأرض في إنتاج شعاع واحد منعكس. وتساوي محصلة الحقل في منطقة الاستقبال مجموع الحقل الناجم عن الموجة المباشرة 2 والحقل الناجم عن تأثير سطح الأرض والذي يساوي مجموع حقل الموجة المنعكسة على سطح الأرض 3 وحقل الموجة 1 التي تتبع انحناء سطح الأرض.

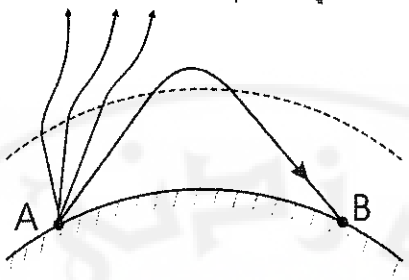


الشكل (١-٤١): حالة انتشار تتألف فيها محصلة الحقل في نقطة الاستقبال B من الشعاع المباشر 2 والشعاع المنعكس على الأرض 3 ومن مركبة أخرى 1 ناجمة عن الانتشار على سطح الأرض مباشرة

نميز عند انتشار الأمواج السماوية حالات عديدة حسب المجال الترددي المستعمل وحسب وضع الطبقات المتأينة في الجو العلوي. ويبين الشكلان (١-٤٢) و (١-٤٣) أهم حالتين من حالات انتشار الأمواج السماوية الممكنة الحدوث.

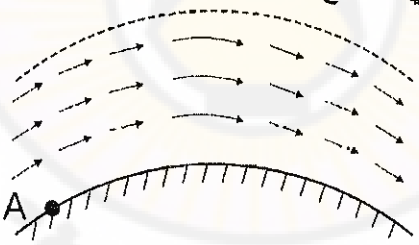
١- يبين الشكل (١-٤٢) حالة انتشار الأمواج السماوية ذات الأهمية الكبيرة في الحياة

العملية. من الشكل نرى أن الأشعة الواردة إلى الجو المتأين بزاوية ميل صغيرة تنعكس فيه وتعود إلى سطح الأرض، بينما تخترق الأشعة التي ترد بزاوية ميل كبيرة طبقات الجو المتأين وتذهب إلى الفضاء الخارجي ولا يتم عكسها فيه.



الشكل (١-٤٢): علاقة مقدرة الجو المتأين على عكس الأمواج الكهرطيسية الواردة إليه بقيم زوايا ورودها إليه

٢- يبين الشكل (١-٤٣) حالة حدية، حيث تنعكس جميع الأشعة بما فيها المائلة كثيراً على الجو المتأين. عندها يمكن اعتبار الجو المتأين جدار " لمرشد أمواج كروي" ، ويشكل سطح الأرض الجدار الآخر لمرشد الأمواج. وتتداخل الأمواج المنعكسة من الجو المتأين والمنعكسة من سطح الأرض بعضها مع بعض داخل مرشد الأمواج مشكلة تيار قدرة منتظماً تقريباً ينتشر داخل مرشد الأمواج الكروي. وترمز الأسهم في الشكل(١-٤٣) إلى اتجاه سريان تيار القدرة . هذا وسيتم في المقاطع القادمة مناقشة حالات انتشار أمواج سماوية أخرى.



الشكل (١-٤٣): انتشار القدرة المشعة من A في مرشد الأمواج الكروي المشكل من الجو المتأين وسطح الأرض

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الثاني

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

٢- انتشار الأمواج الأرضية

٢-١ الصفات الكهربائية للأرض

على المرء عند دراسة حوادث انتشار الأمواج الأرضية تقريب ظروف الانتشار الفعلية قدر الإمكان من الظروف المثالية ليصبح بالإمكان إنجاز العمليات الرياضية بجهد معقول. أهم تقريب من الظروف المثالية هو اعتبار سطح الكرة الأرضية الذي هو في الواقع متموج وغير مستو على أنه مستو بشكل مثالي، وبحيث نعتبر أن لهذا السطح المثالي نفس ثابت العازلية الكهربائية والناقلية النوعية كما هما لسطح الأرض الحقيقي. وتبدو أهمية هذا التقريب من ظروف الانتشار المثالية واضحة إذا ما استعرضنا الأنواع المختلفة لسطح الكرة الأرضية ودرجات عدم استوائها.

إن الجزء الأكبر من سطح الكرة الأرضية وقدره ٧١ ٪ مغطى بالماء الذي يمتلك صفات كهربائية مختلفة (المياه المالحة للمحيطات والبحار وبعض البحيرات، المياه الحلوة للبحيرات والأنهر). وإذا كانت سطوح البحيرات الصغيرة ساكنة عندما تكون الريح هادئة فإن سطوح المحيطات والبحار تكون دائماً متموجة بشكل أو بآخر. ويوجد أيضاً عدم استواء مشابه على سطوح المحيطات والبحار المتجمدة.

على الأرض اليابسة نرى الفروقات التالية: الأراضي الحاوية على الحقول، المروج، المروج الحاوية على الأشجار الصغيرة أوالمغطاة بالغابات، الأراضي الجافة الرملية (الصحراء)، الأراضي التي تحوي هضاب، الأراضي التي تحوي جبالاً مغطاة بالأشجار أو الجبال الصخرية الجرداء.

من وجهة نظر انتشار الأمواج الكهرطيسية نقيم درجة عدم استواء أنواع سطح الأرض المختلفة فقط بنسبة مقاييس عدم الاستواء إلى طول الموجة المنتشرة. ونعتبر مثلاً جميع أنواع سطح الأرض ماعدا الجبال العالية مستوية عند انتشار الأمواج الطويلة فوقها. أما في مجال الأمواج الديسيمترية والأمواج السنتيمترية فتشكل أمواج الماء الصغيرة والنباتات القصيرة في الحقول عدم استواء لا يستهان به.

تقريب آخر من ظروف الانتشار المثالية هو عدم مراعاة التغير المستمر لصفات الأرض الكهربائية الواقعة في طريق انتشار الأمواج الكهرطيسية، إذ أنه من المستحيل في الحسابات العملية مراعاة جميع تغيرات القيم الكهربائية للأرض الواقعة في طريق الانتشار. ويكتفي

المرء عادة عند إجراء الحسابات العملية بمراعاة التغيرات الكبيرة فقط مثل السواحل (أي الانتقال من البحر إلى الأرض اليابسة أو العكس)، والحدود بين الحقول والغابات الكبيرة.
تقريب ثالث من ظروف الانتشار المثالية: بالإضافة إلى ما سبق لا يستطيع المرء مراعاة الحقيقة التالية في الحسابات العملية وهي أن القيم الكهربائية للأرض تتغير بتغير العمق داخل الأرض. وتصبح مثلاً ناقلية الأرض أكبر كلما تم الاقتراب من المياه الجوفية. لذلك يعتبر عمق الأرض الذي هو في الواقع غير متجانس، عند إجراء الحسابات العملية، على أنه أرض متجانسة لها نفس صفات الامتصاص كما هي على سطح الأرض.
بشكل عام يمكن تقسيم أنواع سطح الأرض الموجودة في الطبيعة إلى مجموعتين كبيرتين:

المجموعة الأولى: وتضم أجزاء سطح الأرض التي تحوي عدم استواء ضئيل نسبياً. ويمكن اعتبار هذه السطوح في الحسابات العملية سطوحاً مستوية لها نفس القيم الكهربائية كالسطوح الحقيقية.
المجموعة الثانية: وتضم أجزاء سطح الأرض التي تحوي عدم استواء كبير. ويجب استبدال هذه السطوح عند إجراء الحسابات العملية بسطوح مستوية لها قيم كهربائية مميزه مكافئة. وتختار القيم الكهربائية المكافئة بحيث يكون امتصاص الأمواج الأرضية من سطح الأرض الحقيقي غير المستوي مساوياً للامتصاص الذي يسببه السطح المستوي المكافئ.

أمثلة مميزة لسطوح أرض المجموعة الثانية هي الغابات والمدن الكبيرة. وعلى سبيل المثال ينجم إضعاف الأمواج الكهرطيسية المنتشرة فوق غابة بالدرجة الأولى عن تحرض تيارات في جذوع وفروع الأشجار. ويمكن في هذه الحالة اعتبار جذوع وفروع الأشجار على أنها هوائيات مؤرضه مصنوعة من مادة نصف ناقلة. ومع أن امتصاص الأمواج الكهرطيسية من قبل غابة يختلف كلياً عن حادثة الامتصاص العامة للأمواج الكهرطيسية من سطح نصف ناقل مستو، إلا أنه يمكن اختيار القيم الكهربائية المميزة المكافئة لسطح نصف ناقل مستو بشكل يكون فيه امتصاص الأمواج الكهرطيسية المنتشرة فوق السطح المكافئ هو نفس الامتصاص الذي تتعرض له الأمواج الكهرطيسية عند انتشارها فوق الغابة. وبشكل مشابه يمكن اختيار القيم الكهربائية المميزة المكافئة لسطح نصف ناقل مستوي بشكل يكون فيه امتصاص هذا

السطح مساوياً لامتصاص مدينة كبيرة.

أدرجت في الجدول (٢-١) القيم الكهربائية المميزة الحقيقية لأراضي المجموعة الأولى، والقيم المتوسطة للقيم الكهربائية المميزة لأنواع مختلفة من سطح الأرض.

الجدول ٢-١ : القيم الكهربائية لأنواع سطح الأرض المختلفة

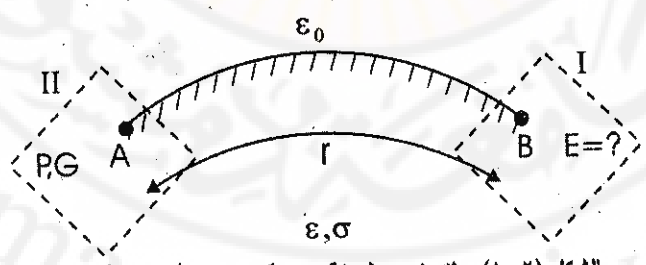
نوع سطح الأرض	ε_r	$\sigma \quad [1/\Omega m]$	القيم المتوسطة	
			ε_r	σ
مياه البحار (المياه المالحة)	80	1 - 4,3	80	4
مياه البحيرات والأنهر الحلوة	80	10^{-3} - 2,4.10^{-2}	80	10^{-3}
الأراضي الرطبة	10 - 30	3. 10^{-3} - 3.10^{-2}	10	10^{-2}
الأراضي الجافة	3 - 6	1,1.10^{-5} - 2.10^{-3}	4	10^{-3}
الغابات *				10^{-3}
المدن الكبيرة *				$7.5.10^{-4}$
الجبال *				$7.5.10^{-4}$

* هذه القيم هي قيم مكافئة لمجال الأمواج المتوسطة

٢-٢ طريقة دراسة انتشار الأمواج الأرضية

عند دراسة حوادث انتشار الأمواج الأرضية نرى أن المشكلة الرئيسية واضحة و يمكن صياغتها على النحو التالي :

على سطح أرض نصف ناقلة وملساء بشكل مثالي ثابت عازليتها الكهربائي النسبي ε_r وناقليتها النوعية σ يوجد في النقطة A جهاز إرسال يشع الاستطاعة P (الشكل ٢-١) .



الشكل (٢-١) : لتوضيح طريقة دراسة انتشار الأمواج الأرضية

هوائي الإرسال موجه و ربحه G . المطلوب تحديد شدة الحقل التي ينتجها جهاز الإرسال في

النقطة B الموجودة على سطح الأرض وعلى بعد r من جهاز الإرسال . نفترض لهذا الفرض أن سطح الأرض متجانس و أن هوائي الإرسال و هوائي الاستقبال موجودان على سطح الأرض مباشرة.

لحل هذه المشكلة سنناقش أولاً وكمدخل في الموضوع حالتين خاصتين لانتشار الأمواج الأرضية . وهاتان الحالتان هما أولاً حالتان سهلتان و ثانياً حالتان تمتلكان معنى خاصاً في الحياة العملية .

الحالة الأولى : من المعلوم أنه بالقرب من النقطة B أي على مسافة كبيرة من هوائي الإرسال تكتسب الموجة الكروية صفات الموجة المستوية . كذلك يكتسب الحقل الكهرطيسي المنتشر على سطح أرض مستوية نصف ناقلة تركيباً جديداً يختلف عن تركيب الحقل الكهرطيسي المنتشر في وسط متجانس . و يمثل المعين المنقط I المبين في الشكل (٢-١) المنطقة المناقشة أعلاه .

الحالة الثانية : نهمل انحناء سطح الأرض على مسافة قريبة من جهاز الإرسال ونعتبره سطحاً مستوياً. ولا نستطيع اعتبار الموجة مستوية بل يجب معالجتها على أنها موجة كروية. وإذا منحنا هذه الأرض المستوية صفات الجسم الناقل المثالي يمكننا حساب شدة الحقل بموجب المعادلة رقم (١-١١) السارية المفعول لحالة اتصال لاسلكي مثالي .

$$E_{eff} = \frac{245 \cdot \sqrt{P_{lkw} \cdot G}}{r_{lkm}} \quad [mV/m] \qquad (١١-١)$$

ونظراً لان الأرض الحقيقية هي عبارة عن نصف ناقل يحدث الضياع فيها بسبب امتصاصها للأمواج الكهرطيسية، لذلك من المهم في التطبيقات العملية تحديد شدة حقل الأمواج التي تنتشر على سطح الأرض المستوي نصف الناقل مع مراعاة هذا الضياع. ويمثل المعين المنقط II المبين في الشكل (٢-١) المنطقة المناقشة أعلاه.

بعد حل هاتين الحالتين الخاصتين يجب معالجة الحالة العامة وهي انتقال الأمواج الكهرطيسية الأرضية حول الكرة الأرضية. ويتبع التسلسل التالي في معالجة انتشار الأمواج الأرضية.

١- انتشار الأمواج الأرضية المستوية على سطح أرض مستو نصف ناقل. وعلى مسافة بعيدة جداً من هوائي الإرسال.

٢- انتشار الأمواج الأرضية الكروية التي تشع من هوائي موجود على سطح أرض مستو

نصف ناقل وعلى مسافة قريبة من هوائي الإرسال.

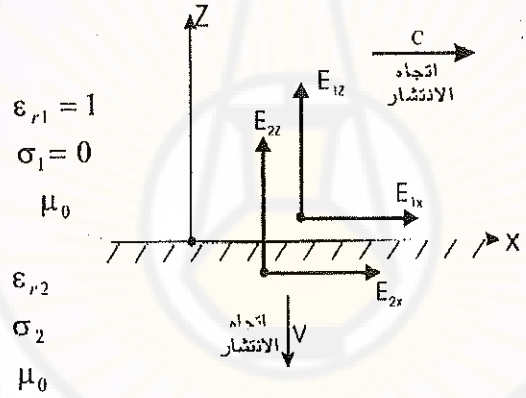
٣- انتشار الأمواج الأرضية التي تشع من هوائي موجود على سطح أرض كروي نصف ناقل حول الأرض الكروية.

٢-٣ انتشار الأمواج المستوية على سطح أرض مستو نصف ناقل

في حل هذه الحالة نفترض أن المنطقة التي تشع منها الأمواج بعيدة جداً عن النقطة التي سنحسب فيها شدة الحقل والموجودة على سطح الأرض. بذلك نستطيع اعتبار السطح الكروي المشكل من زوايا الطور المتساوية سطحاً مستوياً، إذا كان الانتشار يتم في وسط متجانس.

نستعمل محاور الإحداثيات الديكارتية بحيث ينطبق المحور x مع اتجاه الانتشار ويكون المحور z عمودياً عليه ومتجهاً إلى الأعلى (شكل ٢-٢).

نكتب مركبات الحقل الكهرطيسي في الوسط العلوي (الهواء) مصحوبة بالدليل 1، والمركبات في الوسط السفلي (نصف ناقل) مصحوبة بالدليل 2 .



الشكل (٢-٢): لتوضيح انتشار الأمواج المستوية على سطح أرض مستو نصف ناقل

نفترض أن المركبة العمودية للحقل الكهربائي في الهواء معروفة وهي:

$$E_{1z} = \hat{E}_{1z} \cdot e^{j\omega t} \qquad (٢-١)$$

والمطلوب تحديد بقية مركبات الحقل الكهرطيسي في كلا الوسطين.

تعتمد المعالجة التالية على شروط حدية تقريبية وضعت من قبل "Leontowitsch " للسطح الحدي بين الهواء ونصف الناقل. وقد افترض عند وضع هذه الشروط الحدية أن القيمة المطلقة لثابت العازلية الكهربائية العقدي النسبي ε_{kr} لنصف الناقل كبيرة.

عندما تكون القيمة المطلقة للعدد العقدي ε_{kr}كبيرة (بغض النظر عما إذا كان السبب كبر قيمة ثابت العازلية الكهربائية أو كبر الناقلية أو كبر طول الموجة) يصبح طول الموجة في الوسط نصف الناقل صغيراً. بذلك يستطيع المرء تطبيق قوانين الضوء الهندسي على ظروف الانتشار في الوسط نصف الناقل. وإذا تناقص بالإضافة إلى ذلك مطال الحقل عند سطح الوسط نصف الناقل تدريجياً كلما اخترق الحقل الوسط الثاني نصف الناقل إلى عمق أكبر (نتيجة قصر طول الموجة في الوسط الثاني) تشكل بذلك الموجة في الوسط الثاني وبالقرب من السطح المستوي للوسط نصف الناقل سطحاً ينتشر في عمق الوسط الثاني بشكل عمودي حيث يتم امتصاصها فيه. وبشكل عام لا تكون هذه الموجة مستوية، إلا أن نصف قطر انحنائها كبير بالنسبة لطول الموجة ولعمق الاختراق.

وتمتلك مثل هذه الموجة في الوسط نصف الناقل بالتقريب الأول تركيباً عرضانياً، أي أن شعاعي الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي عند السطح الحدي يتجهان باتجاه مماس لمستوى سطح الوسط نصف الناقل ويرتبطان بالعلاقة التالية:

$$\underline{E} = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_k} \cdot [\underline{n}, \underline{H}] \qquad (٢-٢)$$

حيث $\underline{n}$ الناظم الخارجي لسطح نصف الناقل.

ومن الشرط الحدي الدقيق الأول (معادلة ١-٨٦) ترتبط المركبتان الأفقيتان للحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي عند السطح الحدي في الهواء بنفس العلاقة الواحدة مع الأخرى. ويمكن كتابة هذه العلاقة على النحو التالي:

$$H_{1y} = -\sqrt{\frac{\varepsilon_k}{\mu_0}} \cdot E_{1x} \qquad (٣-٢)$$

إن العلاقات بين المركبات الأفقية للحقل في الوسط الأول تحدد من المعادلة (٢-٣) وبمساعدة القيم الكهربائية المميزة للوسط الثاني. وتعتبر الأمواج الناشئة في الوسط الثاني نصف الناقل أمواجاً مستوية تنتشر في عمقه حيث يتم امتصاصها، وتحدد القيم الكهربائية المميزة للوسط الثاني مقدار هذا الامتصاص.

ويمكن دراسة انتشار الأمواج الكهرطيسية في الهواء عند سطح الوسط نصف ناقل بشكل تقريبي عن طريق حل معادلات ماكسويل للهواء، وحلها معلوم وهو:

$$E_{1z} = \hat{E}_{1z} \cdot e^{j\omega\left(t-\frac{x}{c}\right)} \qquad (٤-٢)$$

$$H_{1y} = -\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \cdot \hat{E}_{1z} \cdot e^{j\omega(t-\frac{x}{c})} = -\frac{\hat{E}_{1z}}{120\,\pi} \cdot e^{j\omega(t-\frac{x}{c})} \quad (٢-٥)$$

ومن الشرط الحدي الأول في المعادلة (١-٨٦) تكون المركبتان المماسيتان عند السطح الحدي متساويتين. منه يكون:

$$Z = 0 \rightarrow \quad H_{2y} = H_{1y} \quad (٢-٦)$$

بالإضافة إلى ذلك نحصل من الشرط الحدي التقريبي (معادلة ٢-٣):

$$E_{1x} = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_k}} \cdot H_{1y} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_k}} \cdot E_{1z} \quad (٢-٧)$$

وإذا استعملنا الشرط الحدي الدقيق الأول مرة أخرى نحصل:

$$E_{2x} = E_{1x} \quad (٢-٨)$$

وإذا عوضنا في المعادلة (٢-٧) قيمة ثابت العازلية الكهربائية العقدي النسبي المحددة في المعادلة (١-٤٦) نحصل:

$$E_{1x} = \frac{E_{1z}}{\sqrt{\varepsilon_r - j60\,\lambda\sigma}} \quad (٢-٩)$$

تحدد هذه المعادلة الحقل الكهربائي في الهواء وفوق السطح الحدي الفاصل بين الوسطين مباشرة. وتدل المعادلة (٢-٩) على أن الموجة الكهرطيسية المنتشرة فوق سطح الأرض المستوي نصف الناقل تحصل على مركبة طولانية للحقل الكهربائي، كما تدل على أن مطال المركبة الطولانية أصغر بكثير من مطال المركبة العمودية، وأن المركبة الطولانية تختلف في زاوية الطور عن المركبة العمودية.

بالتحويل إلى الشكل الحقيقي يمكن كتابة المعادلة (٢-٩) بالشكل التالي:

$$E_{1x} = \frac{\hat{E}_{1z}}{\sqrt[4]{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}} \cdot \cos(\omega t + \frac{\alpha}{2}) \quad (٢-١٠)$$

حيث:

$$\alpha = arc\tan \frac{60\lambda\sigma}{\varepsilon_r} \quad (٢-١١)$$

ويصغر مطال المركبة الطولانية للحقل الكهربائي كلما كبرت ناقلية الأرض وكلما كبر طول الموجة. وتقترب E_{1x} من الصفر $(E_{1x} \rightarrow 0)$ عند الانتشار على أرض ذات ناقلية

مثالية ($\sigma \to \infty$). في مجال الأمواج الطويلة والمتوسطة وعندما تكون قيم ناقلية الأرض عادية تكون المركبة الطولانية E_{1x} أصغر بعشرات أو بمئات المرات من المركبة العمودية E_{1z}.

لتحديد المركبة العمودية للحقل الكهربائي للموجة في الأرض نستعمل الشرط الحدي الثاني الدقيق من المعادلة (١-٨٧) الذي يمكن كتابته على النحو التالي:

$$E_{1z} \cdot \varepsilon_o = E_{2z} \cdot \varepsilon_k \qquad (٢-١٢)$$

بتعويض قيمة ε_k في هذه المعادلة نحصل:

$$E_{2z} = \frac{E_{1z}}{\varepsilon_r - j60\lambda\sigma} \qquad (٢-١٣)$$

بالتحويل إلى الشكل الحقيقي يمكن كتابة المعادلة (٢-١٣) بالشكل التالي أيضاً:

$$E_{2z} = \frac{\hat{E}_{1z}}{\sqrt{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}} \cdot \cos(\omega t + \alpha) \qquad (٢-١٤)$$

وتحدد قيمة α من المعادلة (٢-١١).

وبما أن القيمة تحت الجذر في المعادلة (٢-١٠) والمعادلة (٢-١٤) أكبر من الواحد بكثير تصبح المركبة الأفقية لشدة الحقل في الوسط الثاني وفي مجال الأمواج الطويلة والمتوسطة أكبر بكثير من المركبة العمودية.

فيما يلي ندرج معادلات الحقل الكهرطيسي في الهواء وفي الوسط نصف الناقل فوق وتحت السطح الحدي مباشرة:

$$E_{1z} = \hat{E}_{1z} \cos\omega t \qquad (٢-١)$$

$$E_{1x} = E_{2x} = \frac{\hat{E}_{1z}}{\sqrt[4]{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}} \cdot \cos(\omega t + \frac{\alpha}{2}) \qquad (٢-١٠)$$

$$E_{2z} = \frac{\hat{E}_{1z}}{\sqrt{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}} \cdot \cos(\omega t + \alpha) \qquad (٢-١٤)$$

$$H_{1y} = H_{2y} = -\frac{\hat{E}_{1z}}{120\pi} \cos\omega t \qquad (٢-٥)$$

حيث:

$$\alpha = arc\tan \frac{60\lambda\sigma}{\varepsilon_r} \qquad (٢-١١)$$

إن هذه المعادلات صالحة فقط عند تحقق الشروط التالية:

١- الحد الفاصل بين الهواء والأرض هو سطح مستوٍ كما افترض عند معالجة حالة الانتشار هذه.

٢- عندما تكون القيمة المطلقة لثابت العازلية الكهربائية العقدي النسبي ε_{kr} كبيرة بما فيه الكفاية، أي عندما تكون :

آ- ناقلية الأرض كبيرة.

ب- طول الموجة كبيراً.

ج- قيمة ثابت العازلية الكهربائية النسبي ε_r كبيرة.

وبقدر ما تتحقق هذه الشروط تكون نتائج الحساب أدق.

وإذا راعينا أن أهمية الموجة الأرضية، أي الموجة التي تنتشر على سطح الأرض مباشرة تأتي بالدرجة الأولى في مجال الأمواج الطويلة والمتوسطة نرى أن المعادلات السابقة تسد الحاجة في معظم الحالات عند إجراء الحسابات العملية.

سرعة انتشار الأمواج في الهواء فوق السطح الحدي وفي الوسط نصف الناقل

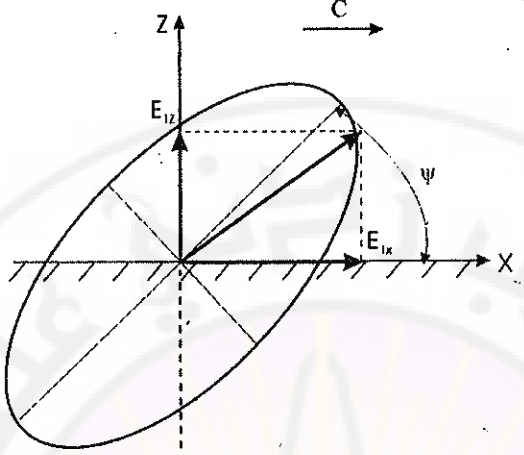
أثبتت القياسات العملية بأن سرعة انتشار الأمواج على سطح الأرض لا تتعلق بالقيم الكهربائية المميزة للأرض ولا تختلف عملياً عن سرعة انتشار الضوء في الفضاء الحر. كما أثبتت القياسات العملية أن سرعة انتشار الأمواج ضمن الأرض هي v، حيث $v = c/n$ ، وتحسب n بموجب المعادلة (١-٥٥).

استقطاب الأمواج الكهرطيسية في اتجاه الانتشار

تبين مما سبق أن المركبة الطولانية للحقل الكهربائي للموجة في الهواء E_{1x} تختلف عن المركبة العمودية E_{1z} في المطال وفي زاوية الطور. بذلك تكون محصلة الحقل الكهربائي ذات استقطاب قطع ناقص في اتجاه الانتشار، وترسم نهاية شعاع المحصلة قطعاً ناقصاً(شكل ٢-٣).

عندما تكون صفات الأرض الكهربائية قريبة من صفات العازل الكهربائي المثالي (أي تسيطر في الأرض بالدرجة الأولى تيارات الانزياح وهذا ما يعبر عنه بالمتراجحة

$\varepsilon_r >> 60\lambda\sigma$) يتناهى الفرق في زاوية الطور بين المركبة الأفقية والمركبة العمودية إلى الصفر ($\alpha \to 0$) . ويصبح الاستقطاب في اتجاه الانتشار استقطاباً مستقيماً.



الشكل (٢-٣): استقطاب قطع ناقص في اتجاه الانتشار عند الانتشار فوق سطح نصف ناقل

بعكس ذلك عندما تقترب صفات الأرض الكهربائية من صفات الناقل (أي عندما تسيطر في الأرض بالدرجة الأولى تيارات النقل) يتناهى الفرق في زاوية الطور بين المركبة الطولانية والمركبة العمودية إلى القيمة $\frac{\alpha}{2} = \frac{\pi}{4}$.

بالنسبة للقيم الكهربائية المميزة للأرض الموجودة غالباً في الطبيعة تكون لامركزية قطع الاستقطاب الناقص كبيرة جداً. عندها يمكن اعتبار استقطاب الحقل الكهربائي في اتجاه الانتشار مستقيماً، ويكون شعاع محصلة الحقل باتجاه المحور الكبير للقطع الناقص. عندها نتكلم على انحناء جبهة الأمواج (بدلاً من استقطاب قطع ناقص في اتجاه الانتشار). وتحدد المعادلة التالية زاوية ميل شعاع محصلة الحقل الكهربائي:

$$\tan\psi = \frac{\hat{E}_{1z}}{\hat{E}_{1x}} = \sqrt[4]{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2} \qquad (٢-١٥)$$

مثال ٢-١:

تنتشر موجة كهرطيسية ترددها $f = 1MHz$ على سطح أرض رطبة قيمها الكهربائية $\sigma = 0.01\ 1/\Omega m$ و $\varepsilon_r = 10$. مطال المركبة العمودية للحقل الكهربائي هو $\hat{E}_{1z}$. المطلوب :

١- حساب قيم مركبات الحقل الكهربائي الأخرى للموجة في الهواء وفي الأرض.

٢- حساب مقاييس القطع الناقص الذي تستقطب عليه الموجة.

الحل:

١- حساب قيم مركبات الحقل الكهربائي في الهواء وفي الأرض.

نقارن أولاً بين قيم تيارات الانزياح وتيارات النقل للتحقق من إمكانية استخدام التقريب حيث طول الموجة $\lambda = 300\ m$

$$\varepsilon_r = 10 << 60\lambda\sigma = 180$$

من المعادلة (٢-١٠).

$$\hat{E}_{1x} = \hat{E}_{2x} \approx \frac{\hat{E}_{1z}}{\sqrt[4]{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}} = \frac{\hat{E}_{1z}}{\sqrt[4]{100 + (60 \cdot 0.01 \cdot 300)^2}} \approx \frac{\hat{E}_{1z}}{13.4}$$

$$\hat{E}_{1x} = \hat{E}_{2x} = 7.45 \cdot 10^{-2} \cdot \hat{E}_{1z}$$

من المعادلة (٢-١٤).

$$\hat{E}_{2z} = \frac{\hat{E}_{1z}}{\sqrt{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}} \approx \frac{\hat{E}_{1z}}{180} = 5.5 \cdot 10^{-3} \cdot \hat{E}_{1z}$$

من المعادلة (٢-١١) نحصل على الفرق في زاوية الطور $\alpha/2$ بين المركبة العمودية والمركبة الأفقية (الطولانية) للحقل في الهواء.

$$\alpha = arc\tan\frac{60\lambda\sigma}{\varepsilon_r} = arc\tan\frac{60 \cdot 0.01 \cdot 3 \cdot 10^2}{10} = arc.\tan 18$$

$$\alpha = 86.5^\circ \rightarrow \frac{\alpha}{2} = 43.25^\circ$$

ذلك يعني أن محصلة الحقل في مستوي الانتشار (اتجاه الانتشار) مستقطبة استقطاب قطع ناقص.

٢- حساب مقاييس القطع الناقص الذي تستقطب عليه الموجة.

يمكن حساب مقاييس القطع الناقص بمساعدة المعادلتين (١-٨٢) :

$$M = \sqrt{(A\cos\psi + C\sin\psi)^2 + D^2\sin^2\psi}$$

$$N = \sqrt{(C\cos\psi - A\sin\psi)^2 + D^2\cos^2}$$

لتوحيد الرموز المستعملة في هذا المقطع مع رموز المقطع (١-٥)، (رموز المعادلتين

العلويتين) نكتب القيم اللحظية للمركبة الأفقية والمركبة العمودية على النحو التالي، ومنها نحدد قيم A و C وD و ψ :

$$E_{1x} = 7.45 \cdot 10^{-2} \cdot \hat{E}_{1z} \cdot \cos\omega t = A\cos\omega t$$

$$E_{1z} = \hat{E}_{1z}\cos(\omega t - 43.25) = C\cos\omega t + D\sin\omega t$$

حيث:

$$A = 7.45 \cdot 10^{-2}\hat{E}_{1z} \qquad C = 0.726\hat{E}_{1z} \qquad D = 0.686\hat{E}_{1z}$$

من المعادلة (١-٨٠) نحسب زاوية ميل المحور الكبير لقطع الاستقطاب الناقص.

$$\tan 2\psi = \frac{2 \cdot A \cdot C}{A^2 - C^2 - D^2} = \frac{2 \cdot 7.45 \cdot 10^{-2} \cdot 0.726}{(7.45 \cdot 10^{-2})^2 - (0.726)^2 - (0.686)^2}$$

$$\tan 2\psi = -0.107 \qquad \psi = 86.55^\circ$$

من المعادلتين (١-٨٢) نحسب طول المحور الكبير والمحور الصغير للقطع الناقص:

$$M = \hat{E}_{1z}\sqrt{(7.45 \cdot 10^{-2}\cos 86.55 + 0.726\sin 86.55)^2 + (0.686\sin 86.55)^2}$$

$$M = 1.009\hat{E}_{1z}$$

$$N = \hat{E}_{1z}\sqrt{(0.726\cos 86.55 - 7.45 \cdot 10^{-2}\sin 86.55)^2 + (0.686\cos 86.55)^2}$$

$$N = 5.12 \cdot 10^{-2}\hat{E}_{1z}$$

ومنه نرى أن نسبة قطر القطع الناقص الكبير إلى القطر الصغير كبيرة جداً، أي أن القطع الناقص مسحوب كثيراً باتجاه القطر الكبير (إهليلجية كبيرة).

إذا قربنا استقطاب القطع الناقص إلى استقطاب مستقيم وحسبنا زاوية ميل جبهة الأمواج بموجب المعادلة التقريبية (٢-١٥) يكون:

$$\tan\psi = \frac{\hat{E}_{1z}}{\hat{E}_{1x}} = \frac{1}{7.45 \cdot 10^{-2}} \qquad \rightarrow \qquad \psi = 85.45^\circ$$

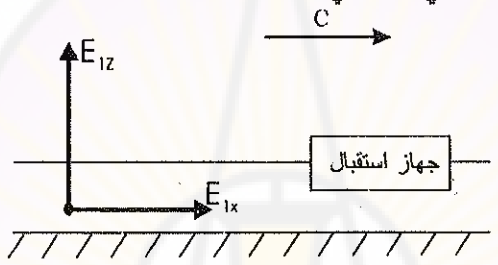
وهي مساوية تقريباً لزاوية ميل القطر الكبير للقطع الناقص.

<u>استقبال الأمواج اللاسلكية في الوسط الأول فوق سطح الأرض</u>

تبين دراسة انتشار الأمواج المستوية على سطح أرض مستو نصف ناقل أن ميلان جبهة الأمواج (أو ميلان القطر الكبير للقطع الناقص عن الشاقول) يحدث فقط في الطبقات الدنيا للجو التي تحد سطح الأرض مباشرة. ولهذه الظاهرة معنى كبير في الحياة العملية. بذلك

نستطيع تفسير إمكانية الاستقبال اللاسلكي بواسطة هوائي أرضي.

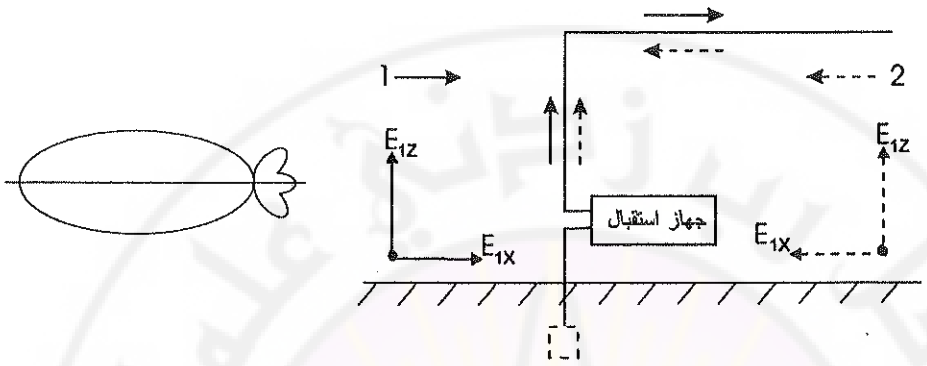
والهوائي الأرضي هو هوائي متناظر ومؤلف من سلكين موضوعين على سطح الأرض مباشرة أو على ارتفاع ضئيل من سطح الأرض. ويستقبل الهوائي الأرضي قدرة الأمواج الكهرطيسية التي تنتشر باتجاه سلكيه. وتتحرض القوة المحركة الكهربائية في سلك الهوائي فقط بتأثير مركبة الحقل الكهربائي للموجة التي تتجه باتجاه السلك. من الشكل (٢-٤) نرى أن استقبال الإشارات اللاسلكية بواسطة الهوائي الأرضي لا يتم إلا إذا وجدت مركبة طولانية للحقل الكهربائي E_x . أما إذا امتلكت الأرض الموجود فوقها الهوائي الأرضي صفات الناقل المثالي فلا يمكن حينئذ استقبال أية إشارات كهرطيسية بواسطة الهوائي الأرضي. وكلما كانت ناقلية الأرض أقل أو كلما كان طول الموجة المستقبلة أقصر أصبحت القوة المحركة الكهربائية المنتجة في الهوائي الأرضي أكبر.



الشكل (٢-٤): استقبال إشارات لاسلكية بواسطة هوائي أرضي

بالإضافة إلى ذلك يمكننا ميلان جبهة الأمواج من تفسير صفات التوجيه للهوائي L . ويستعمل الهوائي L في مجال الأمواج المتوسطة والأمواج الطويلة بكثرة. وتستقبل الهوائيات L الإشارات اللاسلكية بشكل أفضل (بشكل أقوى) إذا وردت الموجة المراد استقبالها باتجاه سلك الهوائي الأفقي ومن جهة زاوية الهوائي (زاوية الهوائي L حيث السلك النازل إلى جهاز الاستقبال). لتسهيل توضيح ذلك نفترض أن الفرق في زاوية الطور بين المركبة العمودية والمركبة الأفقية للحقل الكهربائي قابل للإهمال. إذا أتت الموجة من الاتجاه 1 (انظر الشكل٢-٥) تحرض في كل من الجزء العمودي و الجزء الأفقي من الهوائي قوة محركة كهربائية تؤثر في نفس الاتجاه (الأسهم غير المنقطة) و تكون محصلة هاتين القوتين المحركتين الكهربائيتين مساوية لمجموعهما . أما إذا أتت الموجة من الاتجاه المعاكس أي من النهاية الحرة 2 للسلك الأفقي تنشأ في الجزء العمودي وفي الجزء الأفقي من الهوائي قوتان

محركتان كهربائيتان متعاكستان في زاوية الطور أي متعاكستان في الاتجاه (الأسهم المنقطة)، وتكون محصلة هاتين القوتين المحركتين الكهربائيتين مساوية لحاصل طرحهما ، أي أنهما تزيل الواحدة الأخرى .



الشكل (٢-٥): استقبال إشارات لاسلكية بواسطة هوائي L والمخطط الإشعاعي له

هذا وليس للهوائي L الموجود فوق سطح أرض ذات ناقلية مثالية صفات التوجيه.والتفسير الوحيد لكون الهوائي L هوائياً موجهاً هو صفات الأرض نصف الناقلة . وتكبر درجة توجيه الهوائيL كلما كانت ناقلية الأرض أسوأ وكلما كان طول الموجة المراد استقبالها أقصر . وبناءً على نظرية التبديل المشار إليها في المقطع (١-٨) يمكننا تعميم كل ما قيل عن صفات هوائي الاستقبال L و هوائي الاستقبال الأرضي على هوائي الإرسال L وهوائي الإرسال الأرضي .

<u>استقبال الأمواج اللاسلكية في الوسط الثاني ضمن الأرض</u>

إن النظرية المعالجة أعلاه تمكن من دراسة ظروف استقبال الإشارات اللاسلكية تحت سطح الأرض . سنبحث أولاً ظروف الاستقبال تحت السطح الحدي مباشرة ونقارنها بظروف الاستقبال في الهواء فوق السطح الحدي مباشرة . وتظهر المعادلات (٢-١) و(٢-٥) و(٢-١٠) و(٢-١٤) ما يلي :

المركبة العمودية للحقل الكهربائي في الهواء E_{1z} أكبر بكثير من المركبة الأفقية E_{1x} (أكبر بـ $\sqrt[4]{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}$ مرة) . بعكس ذلك تماماً تكون نسبة المركبة العمودية إلى المركبة الأفقية تحت الأرض . لذلك من الأفضل ومن المجدي إجراء الاستقبال اللاسلكي في الهواء

بواسطة هوائي عمودي وإجراء الاستقبال اللاسلكي تحت سطح الأرض بواسطة هوائي أفقي موجه باتجاه جهاز الإرسال . أما إذا استعملنا هوائياً إطارياً منخفضاً كهوائي استقبال فيمكننا أن نعتبر أن الهوائي الإطاري الموجود في الهوائي يستقبل الإشارات اللاسلكية القادمة بنفس الشدة التي يستقبل بها هوائي إطاري موجود في الأرض، وذلك لأن شدة الحقل المغناطيسي في الهواء مساوية لشدة الحقل المغناطيسي في الأرض.

ويمكن حساب شدة الحقل تحت سطح الأرض من القيم المعروفة للحقل عند السطح الحدي. بموجب ذلك تكون شدة الحقل على عمق h من سطح الأرض مساوية لجداء شدة الحقل تحت السطح الحدي مباشرة بعامل الامتصاص. ويجب هنا حساب عامل الامتصاص بعد افتراض أن الانتشار يتم في وسط نصف ناقل متجانس يمتلك القيم الكهربائية المميزة المكافئة للأرض. فيما يلي معادلة لتحديد المركبة الأفقية للحقل الكهربائي على عمق h من السطح الحدي بعلاقة المركبة العمودية للحقل الكهربائي في الهواء فوق سطح الأرض مباشرة والمعروفة قيمتها:

$$E_{2x} = \frac{\hat{E}_{1z} \cdot e^{-\delta h}}{\sqrt[4]{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}} \cdot \cos\left[\omega\left(t - \frac{h}{v}\right) + \frac{\alpha}{2}\right] \qquad (٢-١٦)$$

ونحدد قيمة ثابت الامتصاص للأرض δ وسرعة الانتشار في الأرض v بموجب المعادلة رقم (١-٥١)، كما نحدد قيمة الانزياح في زاوية الطور $\alpha/2$ من المعادلة (٢-١١). وبنفس الطريقة يمكن حساب المركبة العمودية للحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي للموجة في أعماق الأرض.

مثال ٢-٢:

تنتشر موجة كهرطيسية ترددها $f = 1MHz$ على سطح أرض رطبة قيمها الكهربائية $\varepsilon_r = 10$ و $\sigma = 0.01\ 1/\Omega m$. المطلوب حساب:

١- مطالي الحقلين الكهربائيين $\hat{E}_{2x}$ و $\hat{E}_{2z}$ على عمق $5m$ من سطح الأرض بعلاقة مطال مركبة الحقل الكهربائي العمودية فوق سطح الأرض مباشرة.

٢- القيمة اللحظية للحقل الكهربائي E_{2x} على عمق $5m$ من سطح الأرض.

الحل:

١- حساب مطالي الحقلين الكهربائيين $\hat{E}_{2x}$ و $\hat{E}_{2z}$

نقارن أولاً بين قيم تيارات الانزياح وتيارات النقل للتحقق من إمكانية استخدام التقريب حيث طول الموجة $\lambda = 300m$ وبالتالي:

$$\varepsilon_r = 10 << 60\lambda\sigma = 180$$

- حساب ثابت الامتصاص

بما أن $60\lambda\sigma$ أكبر بكثير من ε_r تأخذ معادلة ثابت الامتصاص (١-٥١) شكل المعادلة رقم (١-٦٩)

$$\delta = \frac{2.\pi.f}{c}\sqrt{\frac{1}{2}\left[-\varepsilon_r + \sqrt{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}\right]} \approx \frac{2\pi}{\lambda}\cdot\sqrt{30\lambda\sigma} = 2\pi\sqrt{\frac{30\sigma}{\lambda}}$$

$$\delta = 2\pi\sqrt{\frac{30\cdot 0.01}{300}} = 0.198\,m^{-1}$$

- حساب مطال المركبة الأفقية (الطولانية) للحقل الكهربائي.

من المعادلة (٢-١٦)

$$\hat{E}_{2x} = \frac{\hat{E}_{1z(z=0)}\cdot e^{-\delta h}}{\sqrt[4]{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}} \approx \frac{\hat{E}_{1z(z=0)}}{\sqrt{60\lambda\sigma}}\cdot e^{-\delta h}$$

$$\hat{E}_{2x} = \frac{\hat{E}_{1z(z=0)}}{\sqrt{180}}\cdot e^{-0.198\cdot 5} = 2.77\cdot 10^{-2}\cdot \hat{E}_{1z(z=0)}$$

- حساب مطال المركبة العمودية للحقل الكهربائي.

من المعادلة (٢-١٤) التي تحدد المطال تحت سطح الأرض مباشرة وبعد ضربها بعامل الامتصاص $e^{-\delta x}$ نحصل:

$$\hat{E}_{2z} = \frac{\hat{E}_{1z(z=0)}\cdot e^{-\delta h}}{\sqrt{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}} \approx \frac{\hat{E}_{1z(z=0)}}{180}\cdot e^{-0.198\cdot 5}$$

$$\hat{E}_{2z} = 2.07\cdot 10^{-3}\cdot \hat{E}_{1z(z=0)}$$

من مقارنة مطال المركبة الأفقية $\hat{E}_{2x}$ و مطال المركبة العمودية $\hat{E}_{2z}$ نرى أن استقبال الإشارات اللاسلكية تحت سطح الأرض يتم بشكل أفضل إذا ما استعملنا هوائياً يتحرض بالمركبة الأفقية للحقل الكهربائي للموجة اللاسلكية.

٢- حساب القيمة اللحظية E_{2x}

من المعادلة (٢-١٦) يكون:

$$E_{2x} = \frac{\hat{E}_{1z} \cdot e^{-\delta h}}{\sqrt[4]{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2}} \cdot \cos\left[\omega(t - \frac{h}{v}) + \frac{\alpha}{2}\right]$$

نحسب قيمة v حيث $v=c/n$ ، وتحدد قيمة n من المعادلة (١-٦٦).

$$n = \sqrt{30\lambda\sigma} = \sqrt{90} = 9.48 \quad \rightarrow v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{9.48} = 31.6 \cdot 10^6 m/s$$

$$\frac{\omega h}{v} = \frac{2\pi \cdot f \cdot h}{v} = \frac{2 \cdot 180 \cdot 10^6 \cdot 5}{31.6 \cdot 10^6} = 56.96$$

من المعادلة (٢-١١) نحدد قيمة $\alpha/2$.

$$\alpha = arc\tan\frac{60\lambda\sigma}{\varepsilon_r} = arc\tan\frac{180}{10} = 86.8$$

ومنه

$$E_{2x} = 27.7[\mu v/m] \cdot \cos(\omega t - 56.96 + 43.4) = 27.7[\mu v/m] \cdot \cos(\omega t - 13.56)$$

مسألة ٢-٣:

تنتشر موجة كهرطيسية على سطح أرض رطبة ترددها $f = 1MHz$ وشدة حقل مركبتها الكهربائية العمودية $E_{1z} = 1 \ mV/m$. المراد استقبال هذه الموجة على عمق $5\ m$ من سطح الأرض بواسطة هوائي إطاري.

احسب شدة الحقل التي يستقبلها الهوائي الإطاري وزاوية طورها بالنسبة لزاوية طور E_{1z} .

٢-٤ انتشار أمواج كهرطيسية تشع فوق سطح أرض مستو نصف ناقل من هوائي موجود فوق سطح الأرض مباشرة

بما أننا سنهمل في هذه الحالة انحناء سطح الأرض فإن طريقة الحساب التالية لتحديد شدة الحقل في منطقة الاستقبال صالحة فقط لمسافات صغيرة نسبياً من جهاز الإرسال. والمهمة الرئيسية لهذه المعالجة هي استخراج معادلة لحساب شدة الحقل في منطقة الاستقبال. ويفضل طبعاً أن يكون شكل المعادلة مشابهاً لشكل المعادلة (١-١١) الخاصة بالاتصال اللاسلكي النظري المثالي مضروباً بعامل التخامد W .

$$E_{eff} = \frac{245\sqrt{P_{/KW} \cdot G}}{r_{/Km}} \cdot W \quad [mV/m] \qquad (٢-١٧-أ)$$

حيث P الاستطاعة المشعة من هوائي الإرسال

G عامل توجيه أو درجة توجيه أو ربح هوائي الإرسال بالنسبة للمشع النظري النقطي

r المسافة بين منطقة الإرسال ومنطقة الاستقبال

أما إذا كان الارتفاع الفعال لهوائي الإرسال والتيار في قاعدة الهوائي معروفين فيمكن حساب شدة الحقل بموجب المعادلة التالية:

$$E_{eff} = \frac{120\pi \cdot I_{/A} \cdot h_{eff\,/m}}{\lambda_{/m} \cdot r_{/Km}} \cdot W \quad [mV/m] \qquad (٢-١٧-ب)$$

حيث I القيمة الفعالة لشدة التيار في قاعدة الهوائي (بطن التيار في قاعدة الهوائي)

h_{eff} ارتفاع الهوائي الفعال

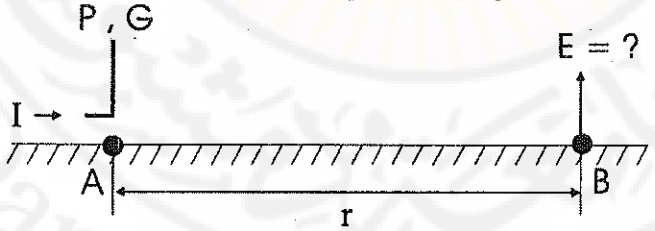
λ طول الموجة

W عامل التخامد (بدون بعد) ويراعي امتصاص الأرض نصف الناقلة للأمواج الكهرطيسية التي تنتشر عليها. وتصبح قيمة عامل التخامد مساوية للواحد عندما تمتلك الأرض التي تنتشر عليها الأمواج الكهرطيسية صفات الناقل المثالي، أي لا يوجد هناك أي ضياع للقدرة.

يوضح الشكل (٢-٦) ظروف انتشار الأمواج الكهرطيسية على أرض مستوية. ويمكن تحديد القيم المميزة لجهاز الإرسال الموجودة في النقطة A بطريقتين كما يتبين من المعادلتين (٢-١٧).

١- إما بإعطاء قيمة الاستطاعة المشعة ودرجة توجيه الهوائي

٢ وإما بإعطاء شدة التيار في قاعدة الهوائي والارتفاع الفعال للهوائي وطول الموجة.



الشكل (٢-٦): لدراسة انتشار أمواج كهرطيسية تشع من هوائي موجود فوق سطح الأرض مباشرة وتنتشر فوق أرض مستوية نصف ناقلة

ونختار لحساب شدة الحقل في منطقة الإرسال إحدى المعادلتين (٢-١٧- آ) أو(٢-١٧- ب)

حسب المعطيات المتوفرة عن جهاز الإرسال.

يحسب عامل التخامد W في المعادلتين (٢-١٧) بموجب معادلة " Von der pol" التالية، التي وضعت بعد دراسة نظرية طويلة وتصحيحات عملية عديدة.

$$W(\rho) = 1 - 2\sqrt{\rho}\cdot e^{-\rho}\int_{j\infty}^{\sqrt{\rho}} e^{\alpha^2}\cdot d\alpha \qquad (٢-١٨)$$

وتحدد قيمة ρ بموجب المعادلة التالية، وهي قيمة مساعدة بدون بعد:

$$\rho = j\frac{\pi\cdot r}{\lambda\cdot(\varepsilon_r - j60\lambda\sigma)} \qquad (٢-١٩)$$

حيث ε_r ثابت العازلية الكهربائية و σ الناقلية النوعية للأرض التي تنتشر عليها الأمواج الكهرطيسية.

إن عامل التخامد $W(\rho)$ هو بموجب المعادلة (٢-١٨) عدد عقدي، ويجب عند حساب شدة الحقل الكهربائي استعمال القيمة المطلقة له $|W(\rho)|$.

من المعادلة (٢-١٩) نرى مباشرة أنه عندما تكون ناقلية الأرض لامتناهية في الكبر $(\sigma \to \infty)$ تنخفض قيمة ρ إلى الصفر. وعند تعويض هذه القيمة لـ ρ في المعادلة (٢-١٨) تصبح قيمة عامل التخامد مساوية إلى الواحد $W(\rho)=1$. بذلك تتطابق قيمة عامل التخامد عند الانتشار على أرض ناقليتها مثالية مع الشرط الذي وضع سابقاً بمساواتها للواحد.

تحدد قيمة عامل التخامد الموجود في المعادلتين (٢-١٧) بموجب المعادلة (٢-١٨). بواسطة هاتين المعادلتين نستطيع حساب شدة الحقل في منطقة الاستقبال عندما تكون القيمة المطلقة لثابت العازلية الكهربائية العقدي النسبي للأرض كبيرة. في الواقع لا يوجد أنواع أرض تقل قيمة ثابت عازليتها الكهربائي النسبي عن الأربعة $(\varepsilon_r \geq 4)$. بذلك تمتلك المعادلة (٢-١٨) إمكانية تطبيق عامة.

يتم تطبيق المعادلة (٢-١٨) على النحو التالي:

- نحدد القيمة المساعدة ρ بموجب المعادلة (٢-١٩) وهي قيمة عددية بدون بعد ونسمى " المسافة الرقمية".

- لتسهيل حساب عامل التخامد بموجب المعادلة (٢-١٨) وضعت لوائح مساعدة ومجموعة منحنيات بيانية يمكن بمساعدتها تحديد قيمة عامل التخامد $|W|$ بسهولة بعد معرفة القيمة

المميزة $|\rho|$.

أما مجموعة المنحنيات البيانية المبينة في الشكل (٢-٧) والموضوعة من قبل "Burrows " فهي واسعة الانتشار وتستعمل غالباً لإجراء مثل هذه العمليات الحسابية، وتستعمل فيها القيمة العقدية المساعدة X والتي تكافئ "المسافة الرقمية " ρ في المعادلة (٢-١٨)، وتحدد X بموجب المعادلة التالية:

$$X = x \cdot e^{j\alpha} = \frac{\pi \cdot r}{\lambda} \cdot \frac{\varepsilon_{kr} - 1}{(\varepsilon_{kr})^2} \qquad (٢-٢٠)$$

حيث

$$x = |X| = \frac{\pi \cdot r}{\lambda} \cdot \frac{|\varepsilon_{kr} - 1|}{\varepsilon_{kr}^2} \qquad (٢-٢٠-آ)$$

$$\alpha = 2arc \cdot \tan \frac{60\lambda \cdot \sigma}{\varepsilon_r} - arc \cdot \tan \frac{60\lambda \cdot \sigma}{\varepsilon_r - 1} \qquad (٢-٢٠-ب)$$

إذا عوضنا في المعادلة (٢-٢٠-آ) ثابت العازلية الكهربائية العقدي النسبي وحسبنا القيمة المطلقة لـ X، نحصل على قيمة x التالية:

$$x = \frac{\pi \cdot r}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{(\varepsilon_r - 1)^2 + (60\lambda \cdot \sigma)^2}}{\varepsilon_r^2 + (60\lambda \cdot \sigma)^2} \qquad (٢-٢١)$$

إذا كانت $\varepsilon_r >> 1$ يمكن تعويض $(\varepsilon_r - 1)^2 \approx \varepsilon_r^2$، بذلك تصبح المعادلة (٢-٢١) على النحو التالي :

$$x = \frac{\pi \cdot r}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r^2 + (60\lambda \cdot \sigma)^2}} \qquad (٢-٢٢)$$

وتتطابق هذه القيمة لـ x مع القيمة المطلقة لـ ρ (معادلة ٢-١٩).

في الحالات التي تكون فيها تيارات النقل في الأرض أكبر بكثير من تيارات الانزياح (أي عندما تكون $60\lambda \cdot \sigma >> \varepsilon_r$) يصبح شكل المعادلة (٢-٢١) أبسط ويأخذ الشكل التالي:

$$x \approx \frac{\pi \cdot r}{60\lambda^2 \sigma} = \frac{100\pi \cdot r_{/Km}}{6\lambda^2_{/m} \sigma} \qquad (٢-٢٣)$$

في الحالات الحدية الأخرى التي تكون فيها تيارات الانزياح أكبر بكثير من تيارات النقل ($60\lambda\sigma << \varepsilon_r$) تأخذ المعادلة (٢-٢١) الشكل التالي:

$$x = \frac{\pi \cdot r(\varepsilon_r - 1)}{\lambda \cdot \varepsilon_r^2} \qquad (٢-٢٤)$$

وإذا كانت بنفس الوقت $\varepsilon_r >> 1$ تصبح المعادلة (٢-٢٤):

$$x \approx \frac{\pi \cdot r}{\lambda \cdot \varepsilon_r} = \frac{1000\pi \cdot r_{/Km}}{\lambda_{/m} \cdot \varepsilon_r} \qquad (٢-٢٥)$$

يبين الشكل (٢-٧) علاقة القيمة المطلقة لعامل التخامد $|W|$ بالقيمة x. وقد أدرجت هذه العلاقة بالمقياس اللوغاريتمي لخمس قيم $Q = \varepsilon_r / 60\lambda\sigma$. إن استعمال مجموعة المنحنيات سهل بشكل لا يحتاج إلى أي شرح. ويجدر هنا الذكر بأن قيمة عامل التخامد تتناهى إلى الواحد ($|W| \rightarrow 1$) عندما تكون قيم x صغيرة.

إذا لم تتوافر مجموعة المنحنيات البيانية المبينة في الشكل (٢-٧) يمكن حساب عامل التخامد بموجب المعادلة التالية:

$$|W| \approx \frac{2 + 0.3x}{2 + x + 0.6x^2} \qquad (٢-٢٦)$$

وإذا كانت $x > 25$ تأخذ المعادلة (٢-٢٦) الشكل البسيط التالي:

$$|W| = \frac{1}{2x} \qquad (٢-٢٧)$$

يمكن استعمال المعادلة (٢-٢٠) في حساب المركبة العمودية لشدة الحقل الكهربائي على سطح الأرض في منطقة الاستقبال وعلى مسافات قريبة من جهاز الإرسال، أي عندما يمكن إهمال تأثير انحناء سطح الأرض.

وقد مكنت مقارنة القيم المحسوبة مع القيم المقاسة لشدة الحقل في منطقة الاستقبال من تحديد المسافات القصوى التي يمكن فيها تطبيق المعادلة (٢-٢٠) في حساب شدة الحقل. ويبين الجدول (٢-٢) هذه المسافات.

جدول ٢-٢ المسافات القصوى لصلاحية المعادلة (٢-٢٠)

مجال طول الموجة $[m]$	المسافات القصوى لمنتصف مجال طول الموجة $[Km]$
200 - 20000	300 - 400
50 - 200	50 - 100
10 - 50	10

مثال (٢-٤):

المطلوب حساب شدة الحقل على بعد $250Km$ من جهاز الإرسال، عندما يكون الانتشار على سطح أرض رطبة .

الاستطاعة المشعة $P = 30KW$

طول الموجة $\lambda = 1200m$

ربح الهوائي $G = 1.5$

الحل:

من الجدول (٢-١) نحصل على القيم الكهربائية للأرض الرطبة.

$$\varepsilon_r = 10 \qquad \sigma = 0.01 \ [1/\Omega m]$$

ومنه يكون $Q = \varepsilon_r / 60\lambda\sigma = 0.014$ بالتالي $60\lambda\sigma >> \varepsilon_r$

بذلك يمكن استعمال المعادلة (٢-٢٣) في تحديد المسافة الرقمية x.

$$x \approx \frac{\pi \cdot r}{60\lambda^2 . \ \sigma} = \frac{\pi.250.10^3}{60 \cdot 1200^2 \cdot 0.01} = 0.91 \qquad 2x=1.82$$

من مجموعة المنحنيات البيانية المبينة بالشكل (٢-٧) نحدد قيمة عامل التخامد وهي:

$$|W| = 0.67$$

بتطبيق المعادلة (٢-٢٦) تكون قيمة عامل التخامد:

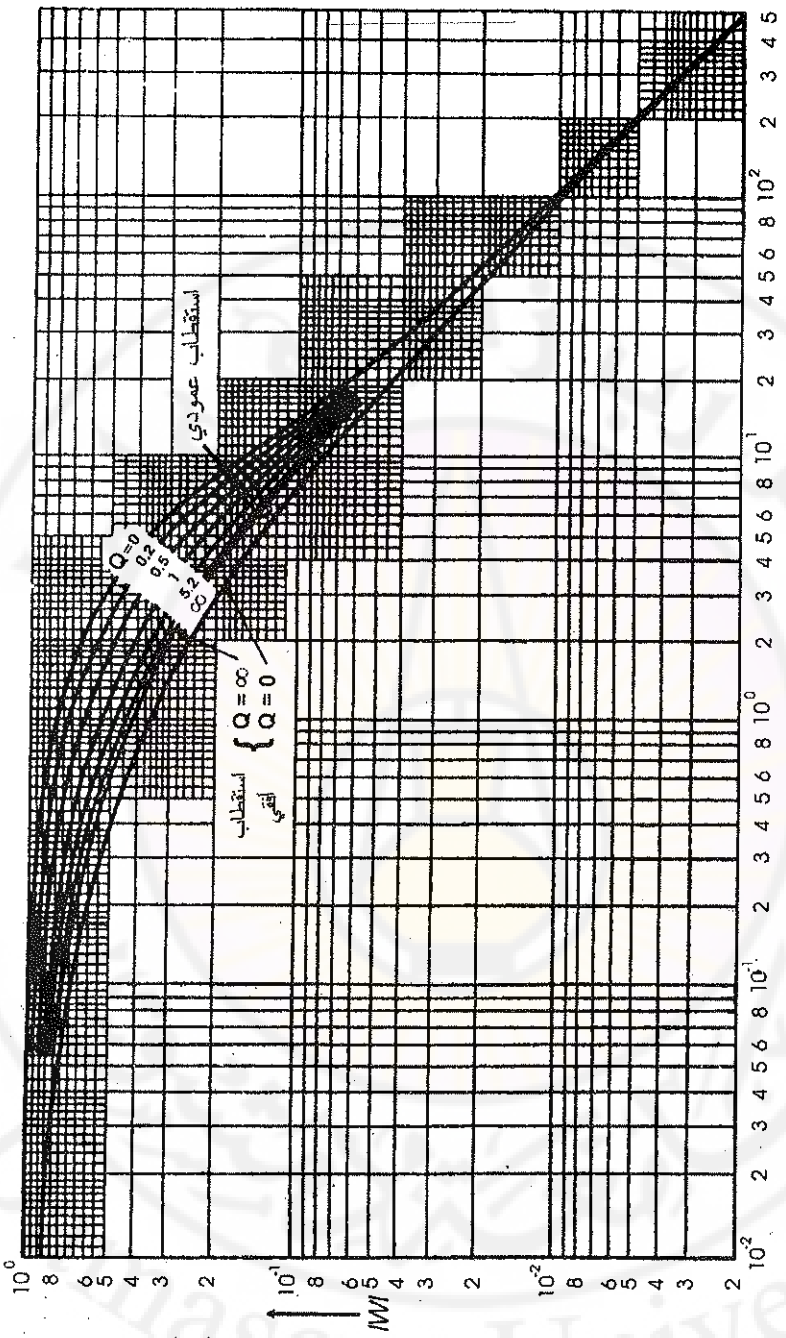
$$|W| \approx \frac{2+0.3x}{2+x+0.6x^2} = \frac{2+0.3 \cdot 0.91}{2+0.91+0.6 \cdot 0.91^2} = 0.66$$

بواسطة المعادلة (٢-١٧-أ)

$$E_{eff} = \frac{245\sqrt{P_{/KW} \cdot G}}{r_{/Km}} \cdot |W|[mV/m] = \frac{245\sqrt{30 \cdot 1.5}}{250} \cdot 0.67 = 4.4\,mV/m$$

مثال (٢-٥):

المطلوب تحديد التيار في قاعدة هوائي عمودي مؤ رض ارتفاعه الفعال $h_{eff} = 22m$ وينتج على بعد $r = 90Km$ من جهاز الإرسال شدة حقل $E_{eff} = 40\mu v/m$. طول الموجة المنتشرة $\lambda = 150m$ ويتم الانتشار على سطح أرض جافة.



الشكل(٢-٧):علاقة القيمة المطلقة لعامل التخامد $|W|$

بالمسافة الرقمية x ولقيم مختلفة لـ $Q = \varepsilon_r / 60\lambda\sigma$.

الحل:

من الجدول (٢-١) نحصل على القيم الكهربائية للأرض الجافة.

$$\varepsilon_r = 4 \qquad \sigma = 0.001[1/\Omega m]$$

بذلك يكون:

$$60\lambda\sigma = 9 \qquad Q = \frac{\varepsilon_r}{60\lambda\sigma} = \frac{4}{9} = 0.44$$

منه نرى بأنه لا يمكن تقريب المعادلة (٢-٢٣)، ويجب تحديد المسافة الرقمية x بموجب هذه المعادلة.

$$x = \frac{\pi \cdot r}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{(\varepsilon_r - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2}}{\varepsilon_r^2 + (60\lambda\sigma)^2} = \frac{\pi \cdot 90 \cdot 10^3}{150} \cdot \frac{\sqrt{(4-1)^2 + (60 \cdot 150 \cdot 0.001)^2}}{16 + (60 \cdot 150 \cdot 0.001)^2}$$

$$x = \frac{\pi \cdot 900}{1.5} \cdot \frac{\sqrt{90}}{97} = 184$$

بما أن قيمة x كبيرة نحسب عامل التخامد بموجب المعادلة التقريبية (٢-٢٧).

$$|W| \approx \frac{1}{2x} = \frac{1}{2 \cdot 184} = 0.0028$$

نعوض قيمة عامل التخامد هذه في المعادلة (٢-١٧- ب).

$$E_{eff} = \frac{120\pi \cdot I_{/A} \cdot h_{eff/m}}{\lambda_{/m} \cdot r_{/Km}} \cdot |W| \quad [mV/m]$$

$$0.040 = \frac{120\pi \cdot I \cdot 22 \cdot 0.0028}{150 \cdot 90}$$

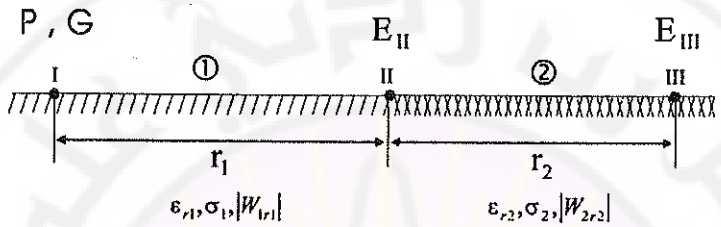
$$I = \frac{0.040 \cdot 150 \cdot 90}{120\pi \cdot 22 \cdot 0.0028} = \frac{540}{23.5} = 23.2\,A$$

٢-٥ انتشار الأمواج الأرضية على أراضٍ مختلفة النوع

في الواقع من النادر أن تنتشر الأمواج الأرضية على أراض من نوع واحد. وغالباً ما يتم انتشار الأمواج الكهرطيسية في طريقها من هوائي الإرسال إلى هوائي الاستقبال على أراض مختلفة النوع لها قيم كهربائية مختلفة. فيما يلي لن نأخذ الحالات التي يكون فيها تغير القيم الكهربائية للأرض متدرج بعين الاعتبار، وسنعالج ظواهر الانتشار عند تخطي الحدود بين

وسطين مختلفين. يمكن بعدها تعميم حل هذه الحالة على الحالة العامة وهي انتشار الأمـــواج الأرضية الكهرطيسية على سطح أراض مختلفة النوع.

يوضح الشكل (٢-٨) حالة الانتشار هذه. يوجد في النقطة I جهاز إرسال وفي النقطـــة III جهاز استقبال. تمثل النقطة II الحد الفاصل بين نوعين مختلفين من الأرض لهما قيم كهربائية مختلفة. ويوجد هناك عدة طرق تقريبية لحساب شدة الحقل في النقطة III سنعالج فيمـــا يلـــي أهمها:



الشكل (٢-٨): انتشار الأمواج الأرضية على نوعين مختلفين من الأرض

١- طريقة " الاستطاعة المفترضة " (الشكل ٢-٩)

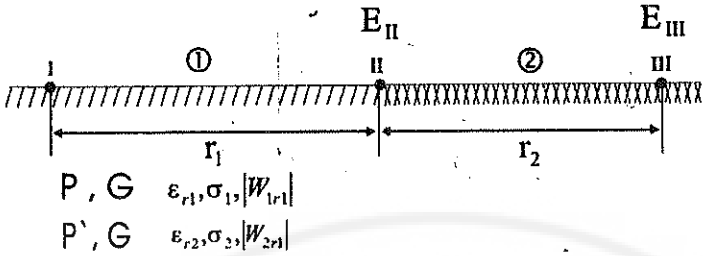
نحدد أولاً شدة الحقل الكهربائي عند الحد الفاصل بين الوسطين (النقطة II) بموجب المعادلة التالية :

$$E_{II\cdot eff} = \frac{245\sqrt{P\cdot G}}{r_1}\cdot|W_{1r1}| \qquad (٢٨-٢)$$

حيث تمثل $|W_{1r1}|$ عامل التخامد لوسط الانتشار الأول $(\varepsilon_{r1},\sigma_1)$ وللمسافة r_1 . بعد ذلـك نحدد الاستطاعة P' التي يجب أن يشعها الهوائي لتوليد نفس شدة الحقل E_{II} في النقطة II إذا كانت الأرض التي تشكل المسافة I-II هي من نوع الأرض الثاني $(\varepsilon_{r2},\sigma_2)$ ولـنفس المسافة r_1 . بحساب شدة الحقل هذه ومساواتها بالمعادلة (٢-٢٨) نحصل على معادلـة ذات الشكل التالي :

$$E_{II\cdot eff} = \frac{245\sqrt{P\cdot G}}{r_1}\cdot|W_{1r1}| = \frac{245\sqrt{P'\cdot G}}{r_1}\cdot|W_{2r1}| \qquad (٢٩-٢)$$

حيث تمثل $|W_{2r1}|$ عامل التخامد لوسط الانتشار الثاني $(\varepsilon_{r2},\sigma_2)$ وللمسافة r_1 .



الشكل (٢-٩): تحديد شدة حقل الأمواج الأرضية بطريقة الاستطاعة المفترضة.

من المعادلة (٢-٢٩) نحدد قيمة P' .

$$P' = P\frac{|W_{1r1}|^2}{|W_{2r1}|^2} \qquad (٢-٣٠)$$

من السهل الآن حساب شدة الحقل في النقطة III الناتجة عن إشعاع الاستطاعة P' من هوائي مفترض موجود في النقطة I، حيث نتصور الآن وكأن الأمواج تنتشر كل المسافة I-III على نوع واحد من الأرض هو أرض الوسط الثاني $(\varepsilon_{r2},\sigma_2)$. بتطبيق المعادلة (٢-١٧- آ) نحصل:

$$E_{III\cdot eff} = \frac{245\sqrt{P'\cdot G}}{r_1+r_2}\cdot|W_{2(r1+r2)}| \qquad (٢-٣١)$$

بتعويض قيمة P' من المعادلة (٢-٣٠) في المعادلة (٢-٣١) نحصل على معادلة حساب شدة الحقل في النقطة III .

$$E_{III\cdot eff} = \frac{245\sqrt{P\cdot G}}{r_1+r_2}\cdot\frac{|W_{1r1}|\cdot|W_{2(r1+r2)}|}{|W_{2r1}|} \qquad (٢-٣٢)$$

٢- طريقة " المسافة المفترضة " (الشكل ٢-١٠)

يمكن تحويل الطريقة السابقة بحيث نستعمل مسافة مفترضة r_1' بدلاً من الاستطاعة المفترضة P' لحساب شدة الحقل الكهربائي في النقطة III (شكل ٢-١٠). ونعرف المسافة المفترضة بشكل مكافئ للاستطاعة المفترضة.

نحدد أولاً شدة الحقل الكهربائي عند الحد الفاصل (النقطة II) بموجب المعادلة (٢-٢٨). بعد ذلك نحدد المسافة المفترضة r_1' التي يجب أن تقطعها الأمواج الكهرطيسية المشعة من هوائي الإرسال باستطاعة P بحيث تنشأ نفس شدة الحقل E_{II} في النقطة II إذا كانت الأرض

التي تشكل المسافة I-II هي من نوع الأرض الثاني $(\varepsilon_{r2},\sigma_2)$. بحساب شدة الحقل هذه ومساواتها بالمعادلة (٢-٢٨) نحصل على المعادلة التالية:

$$E_{II\cdot eff}=\frac{245\sqrt{P\cdot G}}{r_1}\cdot|W_{1r1}|=\frac{245\sqrt{P\cdot G}}{r_1'}\cdot|W_{2r'1}| \qquad (٢-٣٣)$$

ومنه نحصل على العلاقة التالية:

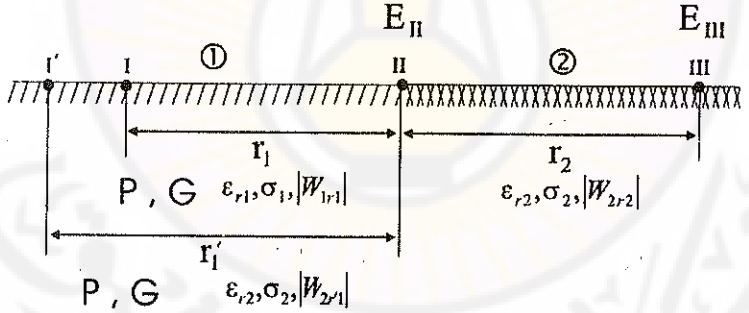
$$\frac{|W_{1r1}|}{r_1}=\frac{|W_{2r'1}|}{r_1'} \qquad (٢-٣٤)$$

التي يجب حلها بالنسبة للمسافة المفترضة r_1'. وبما أن المعادلة $|W_{2r'1}|=f(r_1')$ هي ذات شكل بياني نرى أن حلها لا يتم إلا بيانياً أو بمساعدة طريقة التقريب التدريجي.

وتكون شدة الحقل في النقطة III :

$$E_{III\cdot eff}=\frac{245\sqrt{P\cdot G}}{r_1'+r_2}\cdot|W_{2(r'1+r2)}| \qquad (٢-٣٥)$$

إن طريقة " المسافة المفترضة " أكثر تعقيداً من طريقة " الاستطاعة المفترضة " نظراً لأنه لا يمكن تحديد المسافة r_1' إلا بيانياً. لذلك يندر استعمال طريقة " المسافة المفترضة " في الحسابات العملية.



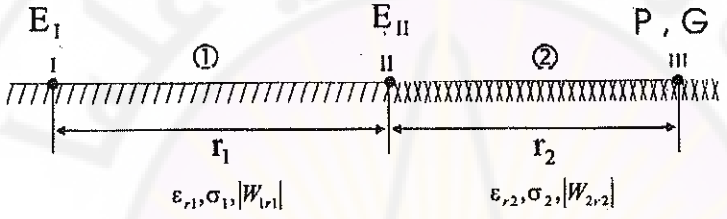
الشكل (٢-١٠): تحديد شدة حقل الأمواج الأرضية بطريقة المسافة المفترضة.

أظهرت مقارنة قيم شدة الحقل المقاسة مع قيم الحقل المحسوبة بموجب الطريقتين السابقتين أن كلتا الطريقتين تقدمان نتائج حساب دقيقة إذا كان طول الموجة أكبر من $600m$ ($f<500KHz$) ولكن شريطة أن لا تختلف القيم الكهربائية المميزة للوسطين (لنوعي الأرض). في الحقيقة تتطابق نتائج طريقة المسافة المفترضة الحسابية مع قيم شدة

الحقل المقاسة بشكل أفضل من طريقة الاستطاعة المفترضة.

أما إذا كان طول الموجة أقل من $600m$ أو كانت الصفات الكهربائية لنوعي الأرض يختلف بعضها عن بعض اختلافاً كبيراً (مثلاً: أرض – بحر) فنحصل على فروق لا يستهان بها بين قيم شدة الحقل المحسوبة وقيم شدة الحقل المقاسة. وتظهر عدم دقة الطريقتين المعالجتين أعلاه بشكل خاص عند تطبيق نظرية التبديل،أي لا تحقق كلتا الطريقتين مبدأ التبديل. ونحصل على نتائج حسابية مختلفة إذا تبادل جهاز الإرسال وجهاز الاستقبال مكانيهما.

لذلك نتبع الطريقة التالية (الشكل ٢-١١): نبادل مكاني جهاز الإرسال وجهاز الاستقبال ونحسب شدة الحقل في النقطة I .



الشكل (٢-١١): تبديل مكاني جهاز الإرسال وجهاز الاستقبال في طريقة الاستطاعة المفترضة

ويصبح شكل معادلة حساب شدة الحقل في النقطة I بموجب طريقة الاستطاعة المفترضة وبعد التبديل كما يلي:

$$E_{I\cdot eff} = \frac{245\sqrt{P\cdot G}}{r_2 + r_1}\cdot\frac{|W_{2r2}|\cdot|W_{1(r2+r1)}|}{|W_{1r2}|} \qquad (٢-٣٦)$$

لإزالة الاختلاف بين نتائج حساب شدة الحقل بموجب الطريقتين السابقتين قبل تطبيق نظرية التبديل وبعد تطبيقها نستخدم إحدى العلاقتين التاليتين لحساب القيمة المتوسطة لشدة الحقل وبحيث تتحقق عندها نظرية التبديل عند حساب شدة الحقل في منطقة الاستقبال:

$$E_{eff} = \frac{2E_{I\cdot eff}\cdot E_{III\cdot eff}}{E_{I\cdot eff} + E_{III\cdot eff}} \qquad (٢-٣٧)$$

$$E_{eff} = \sqrt{E_{I\cdot eff}\cdot E_{III\cdot eff}} \qquad (٢-٣٨)$$

حيث $E_{III\cdot eff}$ شدة الحقل المحسوبة في النقطة III قبل تبديل مكاني جهاز الإرسال وجهاز الاستقبال.

$E_{I\cdot eff}$ شدة الحقل المحسوبة في النقطة I بعد تبديل مكاني جهاز الإرسال وجهاز الاستقبال.

مثال ٢-٦ :

يشع جهاز إرسال استطاعة قدرها $2.5KW$ بتردد قدره $800KHz$. المطلوب تحديد شدة الحقل على بعد $90Km$ من جهاز الإرسال إذا تم الانتشار في $30Km$ الأولى فوق مياه البحر و $60Km$ الباقية فوق أرض رطبة، ربح هوائي الإرسال $G=1.5$.

الحل:

طول الموجة: $$\lambda=\frac{c}{f}=\frac{3\cdot10^{8}\ m/s}{800\cdot10^{3}\ 1/s}=375m$$

من الجدول (٢-١) نحصل على القيم الكهربائية لكلا نوعي الأرض.

مياه البحر $\varepsilon_r=80$, $\sigma=4\quad 1/\Omega m$

الأرض الرطبة $\varepsilon_r=10$, $\sigma=0.01\quad 1/\Omega m$

نختبر إمكانية استخدام التقريب في حساب قيمة x.

مياه البحر $$60\lambda\cdot\sigma=60\cdot375\cdot4=9\cdot10^{4}$$

الأرض الرطبة $$60\lambda\cdot\sigma=60\cdot375\cdot0.01=225$$

بذلك تكون:

مياه البحر $$Q=\frac{\varepsilon_r}{60\lambda\cdot\sigma}=\frac{80}{9\cdot10^{4}}\approx10^{-3}$$

الأرض الرطبة $$Q=\frac{\varepsilon_r}{60\lambda\cdot\sigma}=\frac{10}{225}\approx0.04$$

ومنه يتبين أنه يمكن حساب قيمة x باستعمال المعادلة التقريبية (٢-٢٣) وذلك لمياه البحر وللأرض الرطبة.

$$x\approx\frac{\pi\cdot r}{60\lambda^{2}\cdot\sigma}=\frac{100\pi\cdot r_{/Km}}{6\cdot\lambda^{2}{}_{/m}\cdot\sigma}$$

١- حساب شدة الحقل بموجب طريقة " الاستطاعة المفترضة " (الشكل ٢-٩):

نحسب قيم x وبالتالي قيم $|W|$.

$$x_{1r1}=\frac{100\cdot\pi\cdot30}{6\cdot(375)^{2}\cdot4}=2.8\cdot10^{-3}$$

$$|W_{1r1}|=\frac{2+0.3x}{2+x+0.6x^{2}}=\frac{2+0.3\cdot2.8\cdot10^{-3}}{2+2.8\cdot10^{-3}+0.6\cdot\left(2.8\cdot10^{-3}\right)^{2}}=1$$

$$x_{2r1} = \frac{100 \cdot \pi \cdot 30}{6 \cdot (375)^2 \cdot 0.01} = 1.1$$

$$|W_{2r1}| = \frac{2 + 0.3 \cdot 1.1}{2 + 1.1 + 0.6 \cdot (1.1)^2} = 0.65$$

$$x_{2(r1+r2)} = \frac{100 \cdot \pi \cdot 90}{6 \cdot (375)^2 \cdot 0.01} = 3.36$$

$$|W_{2(r1+r2)}| = \frac{2 + 0.3 \cdot 3.36}{2 + 3.36 + 0.6(3.36)^2} = 0.26$$

نعوض هذه القيم في المعادلة (٢-٣٢) فنحصل على شدة الحقل.

$$E_{III \cdot eff} = \frac{245\sqrt{P_{1KW} \cdot G}}{r_1 + r_2} \cdot \frac{|W_{1r1}| \cdot |W_{2(r1+r2)}|}{|W_{2r1}|} = \frac{245\sqrt{2.5 \cdot 1.5}}{90} \cdot \frac{1 \cdot 0.26}{0.65}$$

$$E_{III \cdot eff} = 2.1 \ \ mV/m$$

٢- حساب شدة الحقل بموجب طريقة " المسافة المفترضة " (الشكل ٢-١٠)

من المعادلة (٢-٣٤) نحصل:

$$\frac{|W_{1r1}|}{r_1} = \frac{|W_{2r'1}|}{r'1} \rightarrow \frac{1}{30} = \frac{|W_{2r'1}|}{r_1'}$$

بالتقريب التدريجي نرى أن هذه المعادلة تتحقق للقيمة $r_1' = 21.5\,Km$

بشكل مشابه لما سبق نحدد قيمة $x_{2(r'1+r2)}$ و $|W_{2(r'1+r2)}|$

$$x_{2(r'1+r2)} = \frac{100 \cdot \pi \cdot (21.5 + 60)}{6 \cdot (375)^2 \cdot 0.01} = 3.03$$

$$|W_{2(r'1+r2)}| = \frac{2 + 0.3 \cdot 3.03}{2 + 3.03 + 0.6 \cdot (3.03)^2} = 0.3$$

نعوض في المعادلة (٢-٣٥) فنحصل على شدة الحقل:

$$E_{III \cdot eff} = \frac{245\sqrt{P \cdot G}}{r_1' + r_2} \cdot |W_{2(r'1+r2)}| = \frac{245\sqrt{2.5 \cdot 1.5}}{21.5 + 60} \cdot 0.3 = 1.75\,mV/m$$

٣- تطبيق نظرية التبديل (الشكل ٢-١١)

نفترض أن الأمواج الكهرطيسية تنتشر باتجاه معاكس، أي الـ $60Km$ الأولى فوق الأرض والـ $30Km$ الباقية فوق مياه البحر وكأن جهاز الإرسال وجهاز الاستقبال قد تبادلا

مكانيهما.

نحسب قيم x وبالتالي قيم $|W|$ بشكل مكافئ لما سبق.

$$x_{2r2} = \frac{100 \cdot \pi \cdot 60}{6 \cdot (375)^2 \cdot 0.01} = 2.23$$

$$|W_{2r2}| = \frac{2 + 0.3 \cdot 2.23}{2 + 2.23 + 0.6 \cdot (2.23)^2} = 0.37$$

$$x_{1r2} = \frac{100 \cdot \pi \cdot 60}{6 \cdot (375)^2 \cdot 4} = 5.8 \cdot 10^{-3}$$

$$|W_{1r2}| = \frac{2 + 0.3 \cdot 5.8 \cdot 10^{-3}}{2 + 5.8 \cdot 10^{-3} + 0.6 \cdot (5.8 \cdot 10^{-3})^2} \approx 1$$

$$x_{1(r2+r1)} = \frac{100 \cdot \pi \cdot 90}{6 \cdot (375)^2 \cdot 4} = 8.37 \cdot 10^{-3}$$

$$|W_{1(r2+r1)}| = \frac{2 + 0.3 \cdot 8.37 \cdot 10^{-3}}{2 + 8.37 \cdot 10^{-3} + 0.6 \cdot (8.37 \cdot 10^{-3})^2} \approx 1$$

نعوض هذه القيم في المعادلة (٢-٣٢) فنحصل على شدة الحقل $E_{I\cdot eff}$:

$$E_{I\cdot eff} = \frac{245\sqrt{P \cdot G}}{r_2 + r_1} \cdot \frac{|W_{2r2}| \cdot |W_{1(r2+r1)}|}{|W_{1r2}|} = \frac{245\sqrt{2.5 \cdot 1.5}}{90} \cdot \frac{1 \cdot 0.37}{1}$$

$$E_{I\cdot eff} = 1.95 \quad [mV/m]$$

أي أن شدة الحقل $E_{I\cdot eff}$ تختلف عن شدة الحقل $E_{III\cdot eff}$ بمقدار 7.7 % تقريباً.

بتطبيق المعادلة (٢-٣٧) نحصل:

$$E_{eff} = \frac{2E_{I\cdot eff} \cdot E_{III\cdot eff}}{E_{I\cdot eff} \cdot E_{III\cdot eff}} = \frac{2 \cdot 2.1 \cdot 1.95}{2.1 + 1.95} = 2.02 \quad [mV/m]$$

بتطبيق المعادلة (٢-٣٨) نحصل:

$$E_{eff} = \sqrt{E_{I\cdot eff} \cdot E_{III\cdot eff}} = \sqrt{2.1 \cdot 1.95} = 2.02 \quad [mV/m]$$

مسألة (٢-٧):

تعمل منارة لاسلكية بحرية موجودة على الأرض اليابسة على بعد $20Km$ من الساحل بتردد $f = 600KHz$.

احسب شدة الحقل الناجمة عن إشعاع استطاعة قدرها $6KW$ من هوائي إرسال المنارة عند باخرة تبعد $80Km$ من المنارة. ربح هوائي الإرسال 1.5 .

٢-٦ انتشار الأمواج الأرضية التي تشع من هوائي موجود على سطح أرض كروي نصف ناقل على سطح الأرض

إن ظاهرة الانحناء هي السبب في اتباع الأمواج الكهرطيسية سطح الكرة الأرضية المقعر. ولا يمكن تطبيق نظرية انحناء الأمواج الضوئية المدروسة من جميع نواحيها النظرية والعملية على انتشار الأمواج الكهرطيسية على سطح الأرض المنحني. والسبب هو أنه تعتبر في علم الضوء الحواجز الواقعة في طريق الانتشار حواجز غير قابلة للتجاوز مهما كانت الصفات الكهربائية لهذه الحواجز. بالإضافة إلى ذلك لا يوجد بين حالات الانحناء الموجودة في علم الضوء حالة تنحني فيها الأمواج الضوئية حول كرة بعد تولدها على سطح الكرة نفسها.

نورد فيما يلي معادلات تمكن من حساب شدة الحقل على سطح الأرض المنحني. هذه المعادلات مهمة بشكل خاص في حساب شدة الحقل في مجال الأمواج الطويلة والمتوسطة. وبما أن العمليات الحسابية لتحديد شدة الحقل على سطح الأرض المنحني معقدة وطويلة فقد جرى وضع منحنيين بيانيين مساعدين لاختصار هذه العمليات وللتمكن من حساب شدة الحقل بمجهود رياضي مقبول.

يمكن حساب شدة الحقل في نقطة الاستقبال الموجودة على سطح الأرض المنحني بموجب المعادلة التالية:

$$E_{eff} = \frac{0.059 \cdot h_{eff} \cdot I}{q \cdot \lambda^{7/6} \cdot \sqrt{r}} \cdot e^{-\frac{\delta}{\lambda^{1/3}} \cdot \vartheta} \quad [mV/m] \qquad (٢-٣٩)$$

حيث:

λ طول الموجة بالكيلومتر.

I شدة التيار في الهوائي بالأمبير.

h_{eff} الارتفاع الفعال لهوائي الإرسال بالكيلومتر.

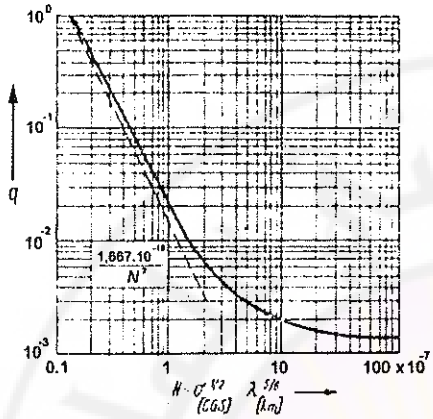
r المسافة بين هوائي الإرسال ونقطة الاستقبال بالكيلومتر.

ϑ الزاوية المركزية التي تكافئ طول القوس r .

q قيمة مساعدة تحدد من المنحني البياني المبين في الشكل (٢-١٢) بعلاقة طول

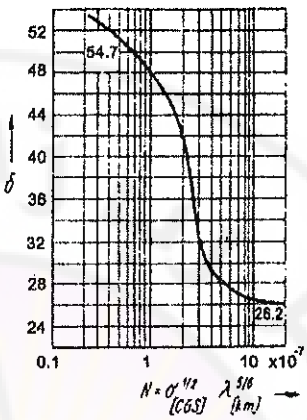
الموجة λ وناقلية الأرض σ.

δ ثابت الامتصاص وتحدد قيمته من المنحني البياني المبين في الشكل (٢-١٣) بعلاقة طول الموجة λ وناقلية الأرض σ .



الشكل (٢-١٢)

لتحديد القيمة المساعدة q



الشكل (٢-١٣)

لتحديد ثابت الامتصاص δ

إذا كانت صفات الأرض الكهربائية قريبة من صفات الناقل $(60\lambda \cdot \sigma >> \varepsilon_r)$ تأخذ المعادلة (٢-٣٩) الشكل التالي:

$$E_{eff} = \frac{3.97 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^{1/2} \cdot \sigma \cdot I \cdot h_{eff}}{\sqrt{r}} \cdot e^{-\frac{\delta}{\lambda^{1/3}} \cdot \vartheta} \quad [\mu V/m] \qquad (٤٠-٢)$$

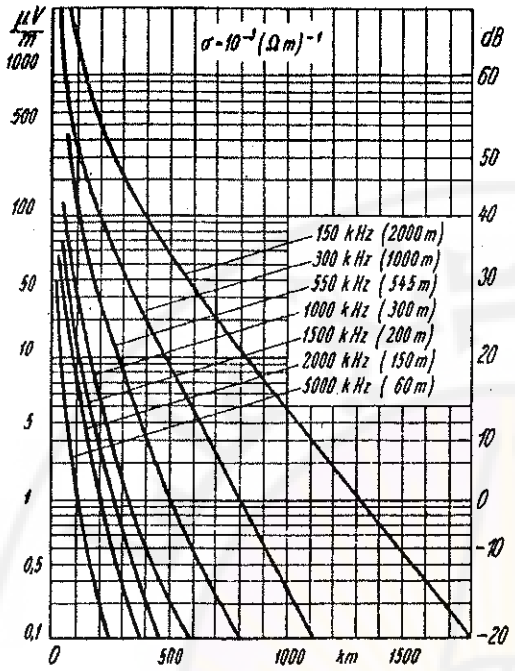
أما إذا كانت صفات الأرض الكهربائية قريبة من صفات العازل الكهربائي $(\varepsilon_r >> 60\lambda \cdot \sigma)$ فتأخذ المعادلة (٢-٣٩) الشكل التالي:

$$E_{eff} = \frac{59 \cdot I \cdot h_{eff} \cdot \varepsilon_r}{\sqrt{r \cdot \lambda}} \cdot e^{-\frac{\delta}{\lambda^{1/3}} \cdot \vartheta} \quad [\mu V/m] \qquad (٤١-٢)$$

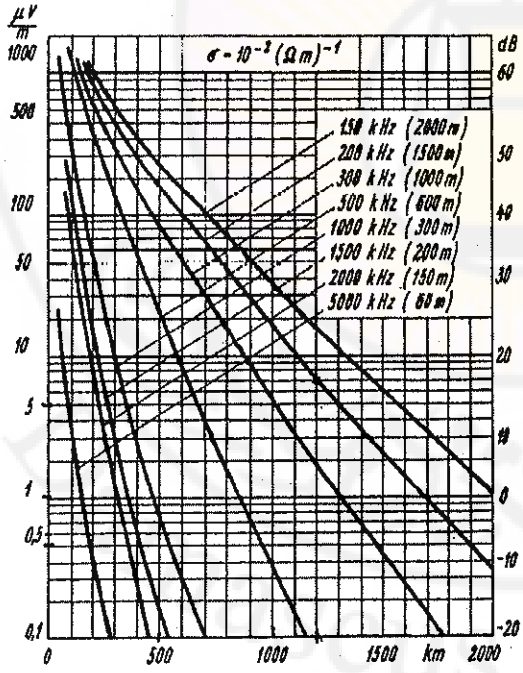
وقد أصدرت المنظمة الدولية الاستشارية للاتصالات اللاسلكية C C I R * ثلاث مجموعات من المنحنيات البيانية (الأشكال ٢-١٤ و ٢-١٥ و ٢-١٦) لتحديد شدة حقل الأمواج الأرضية في المجال الترددي $(f = 150KHz - 5MHz), \lambda = (60 - 2000)m$ لثلاثة أنواع من سطح الأرض. ويشمل هذا المجال الترددي مجال الأمواج المتوسطة $(\lambda = 100 - 1000)m$ وجزءاً صغيراً من مجال الأمواج الطويلة وآخر من مجال الأمواج

* Comité Consultatif International des Radio. communications

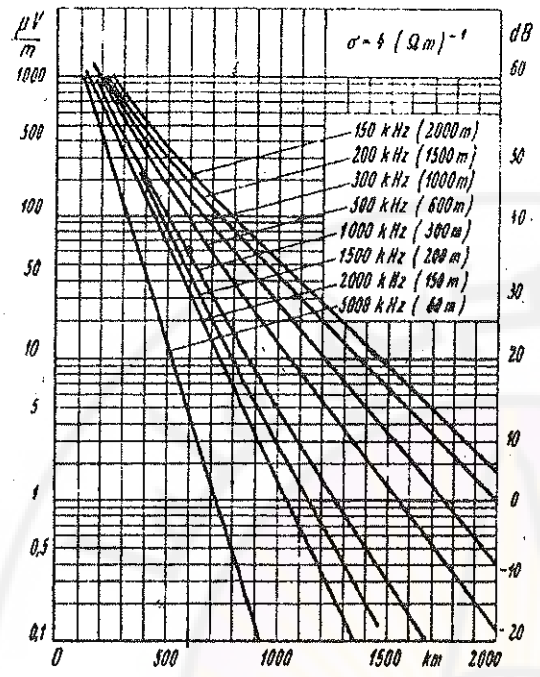
القصيرة.



الشكل (٢-١٤)
شدة حقل الموجة الأرضية بعلاقة المسافة عندما يتم الانتشار فوق أرض جافة (الاستطاعة المشعة *1kw*)



الشكل (٢-١٥)
شدة حقل الموجة الأرضية بعلاقة المسافة عندما يتم الانتشار فوق أرض رطبة (الاستطاعة المشعة *1kw*)



الشكل (٢-١٦)
شدة حقل الموجة الأرضية بعلاقة المسافة عندما يتم الانتشار فوق سطح البحر (الاستطاعة المشعة $1kw$)

تحدد شدة الحقل في حالة الانتشار على الأراضي الجافة من الشكل (٢-١٤) وفي حالة الانتشار على الأراضي الرطبة من الشكل (٢-١٥) وفي حالة الانتشار على مياه البحر من الشكل (٢-١٦) وذلك بعلاقة المسافة r وطول الموجة λ . وتقرأ في هذه المنحنيات شدة الحقل في منطقة الاستقبال والناجمة عن إرسال استطاعة قدرها ١كيلوواط. ويمكن تحديد شدة الحقل في منطقة الاستقبال الناجمة عن إرسال استطاعة ما بعلاقة شدة الحقل المقروءة من المنحنيات إذا راعينا أن شدة الحقل تتناسب مع الجذر التربيعي للاستطاعة المرسلة (معادلة ١-١١)، أي :

$$\frac{E}{E_1} = \frac{\sqrt{P_{1KW}}}{1} \qquad (٢-٤٢)$$

حيث E_1 شدة الحقل في منطقة الاستقبال والناجمة عن إشعاع استطاعة ١ كيلوواط.

E شدة الحقل في منطقة الاستقبال والناجمة عن إرسال استطاعة ما قدرها P .

بذلك يكون:

$$E = E_1 \cdot \sqrt{P_{/KW}} \qquad (٢-٤٣)$$

مثال ٢-٨ :

يشع جهاز إرسال استطاعة قدرها $200KW$ بطول موجة $1500m$. المطلوب تحديد شدة الحقل على بعد $1200Km$ من جهاز الإرسال علماً بأن الأمواج تنتشر فوق أرض رطبة.

الحل:

من الشكل (٢-١٥) نحصل على شدة الحقل E_1 الناجمة عن إشعاع استطاعة قدرها $1KW$.

$$E_1 = 7\,\mu V/m$$

نعوض في المعادلة (٢-٤٣) فنحصل على شدة الحقل الناجمة عن إشعاع استطاعة قدرها $200KW$.

$$E = E_1\sqrt{P_{/KW}} = 7 \cdot \sqrt{200} = 99\,\mu V/m$$

مثال ٢-٩ :

تقاس على بعد $600Km$ من جهاز إرسال شدة حقل قدرها $40\,\mu V/m$. المطلوب تحديد الاستطاعة المشعة من جهاز الإرسال إذا كان يعمل على موجة طولها $300m$ وإذا كانت الأمواج تنتشر فوق سطح البحر.

الحل :

من الشكل (٢-١٦) نحصل على شدة الحقل E_1 الناجمة عن إشعاع استطاعة قدرها $1KW$.

$$E_1 = 60\,\mu V/m$$

نعوض في المعادلة (٢-٤٣) فنحصل على الاستطاعة المشعة التي أنتجت شدة حقل قدرها $40\,\mu V/m$.

$$P = \left(\frac{40}{60}\right)^2 = \frac{16}{36} = 0.44KW$$

الفصل الثالث

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

٣- الجو المتأين

٣-١ مقدمة

للجو المحيط بالكرة الأرضية حتى ارتفاع ٦٠ كم نهاراً وحتى ١٠٠ كم ليلاً نفس تركيب الجو الموجود على سطح الأرض تقريباً. وتتألف طبقات الجو الدنيا أو الجو السفلي بشكل رئيسي من جزيئات الأكسجين والآزوت بالإضافة إلى بخار الماء الموجود بنسبة ١ ٪ . ويكون الجو حتى الارتفاعين المشار إليهما جواً متجانساً مكوناً من مادة عازلة كهربائياً ذات عازلية جيدة، ونعتبره في حسابات انتشار الأمواج الكهرطيسية عازلاً كهربائياً مثالياً.

أما بعد الارتفاعين المذكورين فلا يكون الجو متجانساً ويختلف تركيبه بتغير الارتفاع ويسمى " الجو المتأين " أو " الجو العلوي ".

تحدد طبيعة الجو بصفاته الفيزيائية وأهمها:

١- تركيب الجو.

٢- كثافة الجو، أي عدد الجزيئات في وحدة الحجم.

٣- درجة حرارة الجو.

٤- تحركات الهواء أو الغازات في الجو.

ويتم قياس القيم الدالة على هذه الصفات بعمليات قياس مباشرة وغير مباشرة.

من القياسات المباشرة قياس الضغط الجوي وحرارة الجو وتيارات الهواء بمساعدة مسابر لاسلكية وأجهزة الرادار. ويحدد تركيب الجو بواسطة أجهزة محمولة في صواريخ تجلب معها عينات من الجو. ويمكن بمساعدة المسابر اللاسلكية دراسة الجو حتى ارتفاع ٤٠ كم، وتمكن الأجهزة المحمولة في صواريخ من البحث في تركيب الجو حتى ارتفاع يزيد على ٢٠٠ كم. وتؤدي الأقمار الاصطناعية دوراً مهماً في إجراء دراسات الجو.

٣-٢ التأين

حادثة التأين هي خروج إلكترون (نادراً أكثر) من المدار الخارجي لذرة أو جزيئة من غازات الجو. ويحدث في الجو العلوي المتأين تشطير الأكسجين والآزوت بتأثير أشعة الشمس بالدرجة الأولى، وعلى سبيل المثال:

$$O_2 + h.\upsilon \rightarrow O_2^+ + e \qquad (٣-١)$$

$$N_2 + h.\upsilon \rightarrow N_2^+ + e \qquad (٢-٣)$$

حيث υ تردد الضوء الذي يتم امتصاصه

h ثابت بلانك ، حيث $h = 6.62 \cdot 10^{-27} erg.s.$

وتكافئ القدرة اللازمة لتشطير الأكسجين طول موجة $\lambda < 2500A^\circ$ $(1Angstrom = 10^{-8} cm)$، وتكافئ القدرة اللازمة لتشطير الآزوت طول موجة $\lambda < 1680A^\circ$ ، وبما أن طيف الضوء المرئي يقع في المجال الترددي:

الأشعة البنفسجية $\rightarrow 4000A^o$ حتى $7500A^o \leftarrow$ الأشعة الحمراء

منه نرى أنه لا يمكن أن يحدث تشطير الأكسجين و الآزوت إلا بامتصاص أشعة الشمس فوق البنفسجية $\lambda = 100 - 3800A^\circ$. بامتصاص هذه الأشعة تنشأ في الجو الكترونات سالبة و ايونات موجبة ذات قدرات حركية مختلفة ويتشكل ما يسمى " الجو المتأين" .

أهم أنواع التأين التي تحدث في الجو العلوي هي "التأين بتأثير الضوء" و "التأين بتأثير التصادم ".

<u>التأين بتأثير الضوء :</u>

قدرة التأيين w لغاز ما هي القدرة اللازمة لإخراج إلكترون من المدار الخارجي لذرة أو جزيئة من هذا الغاز. فإذا تعرض هذا الغاز لإشعاعات قدرتها $h.\nu$ يحصل تأين عند تحقق الشرط التالي :

$$h.\upsilon > w \qquad (٣-٣)$$

وإذا كانت حركة الإلكترون المنشطر ضئيلة يكون :

$$h.\upsilon = w + \frac{mv^2}{2} \qquad (٤-٣)$$

حيث m كتلة الإلكترون و v سرعة الإلكترون المنشطر .

ومنه نرى أن تأين غاز ما لا يحدث إلا إذا زاد تردد الأشعة المسلطة على هذا الغاز على قيمة معينة ، ولا يحدث تأين في الغاز إذا كان تردد الأشعة منخفضاً.

<u>التأين بتأثير التصادم :</u>

يحدث التأين بتأثير التصادم إذا تحقق الشرط التالي :

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} > w \qquad (٥-٣)$$

وبالتالي :

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = w + \frac{m_2 v_2^{\ 2}}{2} \qquad (٣-٦)$$

حيث m_1 و v_1 كتلة وسرعة الجزيء المؤين .

m_2 و v_2 كتلة وسرعة الإلكترون المنشطر .

درجت العادة على التعبير عن قدرة التأيين بتأثير التصادم بالإلكترون فولط e.v ، أي :

$$\frac{mv^2}{2} = \text{e.v} \qquad (٣-٧)$$

وعلى التعبير عن قدرة التأيين بتأثير الضوء بطول موجة الأشعة المؤينة ، أي :

$$h.\upsilon = h\frac{c}{\lambda} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{12394}{e.v}\left[A^o\right] \qquad (٣-٨)$$

أدرجت في الجدول (٣-١) قيم قدرة التأيين وطول الموجة اللازمين لتأين الغازات الموجودة في الجو.

الجدول ٣-١ : قدرة التأيين وطول الموجة المؤين للغازات الموجودة في جو الأرض

نوع الغاز	عملية التحويل	طول الموجة المؤين [A°]	قدرة التأيين [e.v]
o_2	$o_2 + h.v \rightarrow o_2^+ + e$	1010	12,3
o	$o + h.v \rightarrow o^+ + e$	910	13,6
o^+	$o^+ + h.v \rightarrow o^{++} + e$	310	39,9
N_2	$N_2 + h.v \rightarrow N_2^+ + e$	800	15,5
N	$N + h.v \rightarrow N^+ + e$	850	14,6
He	$He + h.v \rightarrow He^+ + e$	500	24,8
H_2	$H_2 + h.v \rightarrow H_2^+ + e$	800	15,5
H	$H + h.v \rightarrow H^+ + e$	910	13

من الجدول (٣-١) يتبين أن الأشعة فوق البنفسجية القصيرة ($\lambda < 1010 A^\circ$) يتم امتصاصها كلياً في الجو العلوي وتستهلك في عمليات التأيين .

منابع قدرة التأيين :

المنبع الرئيسي لقدرة التأيين في الجو العلوي هي الشمس ، وتبلغ درجة حرارة سطحها نحو $6000^{\circ}K$ ، وتشع الشمس أمواجاً كهرطيسية في مجال ترددي كبير جداً. يبين الجدول (٣-٢) منابع الأشعة المؤينة لغازات الجو العلوي وشدة تأثيرها التأييني على هذه الغازات. وتقاس شدة التأثير التأييني لأشعة ما بعدد الإلكترونات المنشطرة في ١سم^{3} من الغاز كل ثانية، ويرمز لها بـ I_s .

الجدول (٢-٣): الأشعة المؤينة وتأثيرها التأييني

الأشعة المؤينة	الارتفاع عن سطح الأرض[km]	شدة التأين I_s
الأشعة فوق البنفسجية للشمس	100	250
الأشعة فوق البنفسجية للشمس	250	800
الأشعة الكونية	250	1
الأشعة الجسيمية للشمس (ألفا – بتا- غاما)	100	10^{-5}

٣-٣ تشكل طبقة متأينة في جو متجانس التركيب

لتوضيح كيفية نشوء طبقات متأينة في الجو العلوي نناقش أولاً الحالة البسيطة التالية :

تؤثر الأشعة فوق البنفسجية على جو ذي تركيب متجانس درجة حرارته ثابتة و ينطبق عليه القانون البارومتري

$$P_h = P_0 \cdot e^{-h/H} \qquad (٩-٣)$$

حيث $H = \frac{R \cdot T}{M \cdot g}$

H الارتفاع النسبي و R ثابت الغاز و T درجة حرارة الغاز و M الوزن الذري و g تسارع الأرض.

المطلوب تحديد توزع شدة التأين بعلاقة الارتفاع في هذا الجو.

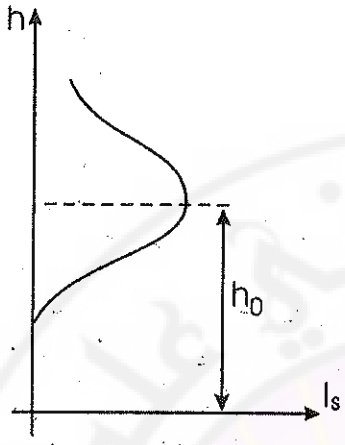
١- لايمكن أن تتشكل شدة تأين قصوى بالقرب من سطح الأرض لأن الأشعة المؤينة لا تحتفظ بالقدرة اللازمة لإحداث حد أقصى للتأين بالقرب منه بعد أن تقطع الجو كله.

٢- تمتلك الأشعة المؤينة قدرة تأيين قصوى عند الحدود الخارجية للجو، إلا أن كثافة الجو

عند ارتفاع هذه الحدود تكون ضئيلة بشكل نحصل فيه على شدة تأين دنيا ولو تأينت جميع الجزيئات الموجودة في الحدود الخارجية للجو.

٣- تظهر المعالجة الرياضية بأن الحد الأقصى للتأين يتشكل على ارتفاع معين من سطح الأرض h_0 . ويكبر هذا الارتفاع كلما ازدادت درجة حرارة الجو وكلما نقص الوزن الذري للغاز المتأين وكلما ازدادت قدرة الجو على امتصاص القدرة المؤينة.

يوضح الشكل (٣-١) الحد الأقصى لشدة التأين بعلاقة الارتفاع، حيث h الارتفاع عن سطح الأرض و I_s عدد الالكترونات المنشطرة في ١ سم^3 من الغاز كل ثانية.



الشكل (٣-١): الحد الأقصى لشدة التأين بعلاقة الارتفاع لجو متجانس درجة حرارته ثابتة وينطبق عليه القانون البارومتري.

٣-٤ : تشكل عدة طبقات متأينة في الجو العلوي

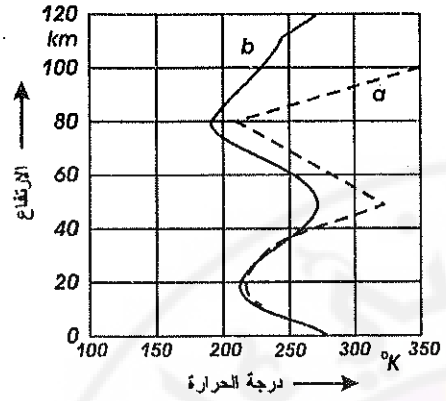
في الواقع تختلف ظروف التأين في جو الأرض العلوي عما ورد في المقطع (٣-٣) حول ظروف التأين في جو متجانس التركيب، حيث :

١- يمكن اعتبار جو الأرض متجانس التركيب حتى ارتفاع ٦٠ كم نهاراً و١٠٠ كم ليلاً من سطح الأرض. بعد ذلك يكون الجو غير متجانس وتكون غازات الجو منشطرة.

٢- درجة حرارة الجو غير ثابتة وتتغير بتغير الارتفاع وبشكل غير خطي. يبين الشكل (٣-٢) تغير درجة الحرارة بعلاقة الارتفاع حتى ارتفاع ١٢٠ كيلومتراً من سطح الأرض. وتصل درجات الحرارة على ارتفاعات أعلى حتى $2000^\circ K$. بذلك يكون توزع التأين في جو الكرة الأرضية العلوي بعلاقة الارتفاع مختلف جذريا عن توزع التأين في جو متجانس (الشكل ٣-١) للأسباب التالية:

١- يؤثر على الجو طيف مستمر من الأشعة المؤينة، وبالدرجة الأولى أشعة الشمس فوق البنفسجية. لهذه الأشعة أطوال موجة مختلفة وبذلك قدرات تأيين مختلفة. بذلك يتم امتصاص

القدرة المؤينة بشكل مختلف حسب الارتفاع وحسب نوع الغاز.



الشكل (٣-٢):تغير درجة الحرارة بعلاقة الارتفاع
a – كما حسبت من قبل Penndrof .
b – كما سجلت من قبل صاروخ أطلق في New Mexico

٢- تساعد التغيرات الكبيرة في درجة الحرارة بعلاقة الارتفاع عن سطح الأرض على تشكل حدود قصوى للتأين. ويسبب انخفاض درجة الحرارة تكاثف الجو وبذلك ارتفاع عدد الإلكترونات المنشطرة.

٣- بالإضافة إلى تأثير الأشعة فوق البنفسجية المستمر هناك تأثير الأشعة الجسيمية للشمس. وتختلف صفات التأيين لهذه الأشعة عن صفات التأيين للأشعة فوق البنفسجية.

بتأثير هذه العوامل تتشكل في جو الكرة الأرضية العلوي عدة طبقات متأينة، ويمكن القول إنه تتشكل في الجو العلوي طبقة متأينة ذات حدود تأيين قصوى متعددة.

وقد أظهرت المراقبة العملية لجو الكرة الأرضية العلوي بأن عدد الطبقات المتأينة أو عدد الحدود القصوى للتأين يبلغ أربعة على الأقل. وتسمى هذه الطبقات طبقات "Kennelly Heaviside" لأنهما أول من أشار إلى وجود هذه الطبقات في جو الكرة الأرضية.

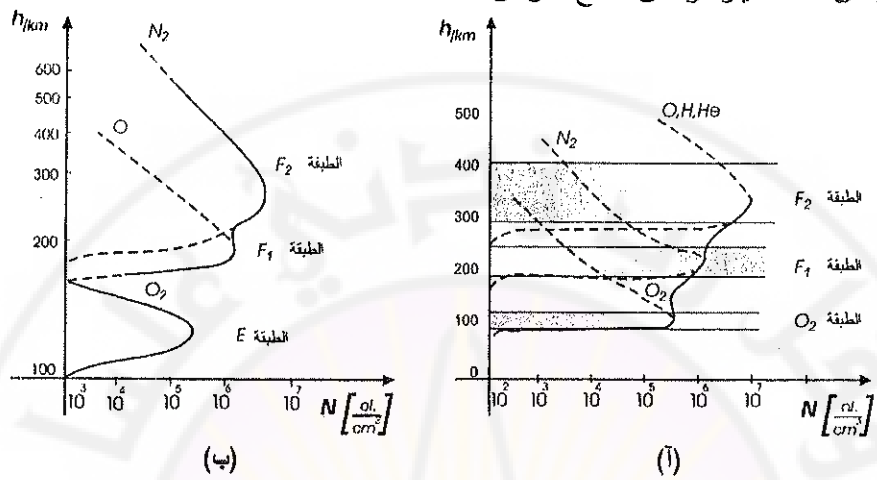
يبين الشكل (٣-٣) إمكانيتي تشكل طبقات متأينة في جو الكرة الأرضية العلوي غير المتجانس، حيث أدرجت على المحور الأفقي كثافة الإلكترونات N (عدد الإلكترونات في ١سم^3) وعلى المحور العمودي الارتفاع عن سطح الأرض h بالكيلومتر.

في حالة الشكل (٣-٣- آ) يتبين ما يلي:

١- تنشأ الطبقة E في المنطقة التي تتأين فيها جزئيات الأكسجين O_2 وهي موجودة على ارتفاع أكبر من ١٠٠ كيلومتر من سطح الأرض.

٢- تنشأ الطبقة F_1 في المنطقة التي تتأين فيها جزئيات الآزوت N_2 بشدة وهي موجودة على ارتفاع أكبر من ٢٢٠ كيلومتر من سطح الأرض.

٣- تنشأ الطبقة F_2 في المنطقة التي تتأين فيها ذرات الأكسجين O والهدروجين H والهيليوم H_e. ويوجد في هذه الطبقة أعلى عدد من الشحنات الكهربائية، وهي موجودة على ارتفاع أكبر من ٢٨٠ كيلومتراً من سطح الأرض.



الشكل (٣-٣): إمكانيتا تشكل طبقات متأينة في جو الكرة الأرضية العلوي

٤- تنشأ الطبقة D (غير مبينة في الشكل) تحت الطبقة E وعلى ارتفاع يتراوح بين ٦٠-٨٠ كيلومتراً من سطح الأرض.

عند ابتداء ظلمة الليل تبدأ الطبقة D والطبقة F_1 بالزوال، وتنخفض كثافة الإلكترونات في الطبقة E والطبقة F_2 ، إلا أن هاتين الطبقتين تحافظان على وجودهما طوال الليل.

ويحدث في الليل اتحاد بين الإلكترونات والأيونات تنشأ عنه جزيئات حيادية. وسبب هذا الاتحاد هو أن الإلكترونات والأيونات يقترب بعضها من بعض، أي أنها بعضها يجذب البعض بفعل القوى الكهربائية الساكنة وتتحد منشئة ذرات وجزيئات حيادية. كذلك تتحد الإلكترونات والأيونات بفعل تصادم بعضها مع بعضها الآخر. ويمكن التعبير عن هذا التحول بالشكل التالي لذرات وجزيئات الأكسجين على سبيل المثال:

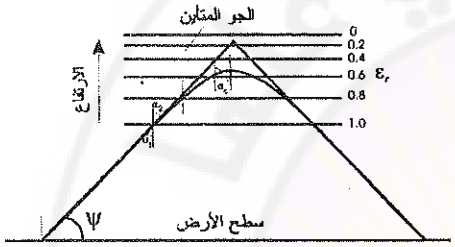
$$O^+ + e \rightarrow O + h\cdot\upsilon \qquad (١٠-٣)$$

$$O_2^+ + e \rightarrow O_2 + h\cdot\upsilon \qquad (١١-٣)$$

عند اتحاد إلكترون وأيون تنتشر في الجو قدرة مساوية للقدرة التي تم امتصاصها عندما حدث التأين.

٣-٥ انكسار وانعكاس الأمواج الكهرطيسية في الجو المتأين

نتيجة التأين يفقد غاز الجو المتأين في كل طبقة من طبقاته صفات العازلية الكهربائية أكثر فأكثر بزيادة كثافة الإلكترونات، ويكتسب عوضاً عنها صفات الناقلية. وبسبب عدم التجانس هذا بالدرجة الأولى عدم انتشار الأمواج الكهرطيسية على مسار مستقيم بل على مسار منحنٍ. ويمكن القول إنه يحدث للأمواج الكهرطيسية انكسار تدريجي في وسط ذي عامل انكسار متغير. بذلك لا تكون قيمة ثابت العازلية الكهربائية النسبي ε_r ثابتة بل متغيرة، وتتناقص من القيمة ١ إلى الصفر بازدياد كثافة الإلكترونات أي بازدياد شدة التأين.



الشكل (٣-٤): انعكاس وانكسار الموجة السماوية في الجو المتأين

بذلك تتناقص زاوية ورود الشعاع إلى الجو المتأين α_1 إلى أن تبلغ قيمة زاوية حرجة α_c حيث تنعكس الموجة الكهرطيسية انعكاساً كلياً وتعود إلى سطح الأرض كما هو مبين في الشكل (٣-٤).

يحدد تردد الموجة وشدة تأين الجو واتجاه الشعاع الوارد إلى الجو المتأين المكان الذي يحدث فيه الانعكاس الكلي داخل الجو المتأين. وتحدد المعادلة التالية العلاقة بين تردد الموجة الكهرطيسية وكثافة الالكترونات في نقطة انعكاسها وزاوية إشعاع الهوائي:

$$f = \sqrt{\frac{80.8 \cdot N(1+2h/R)}{\sin^2\psi + 2h/R}} \qquad (٣-١٢)$$

حيث:

f تردد الموجة الكهرطيسية بـ KHz .

N كثافة الالكترونات في الجو المتأين الذي تنتشر فيه الموجة بـ $el./cm^3$.

h ارتفاع الجو المتأين عن سطح الأرض بالكيلومتر.

ψ زاوية إشعاع الهوائي.

R نصف قطر الكرة الأرضية بالكيلومتر (6370 Km).

من المعادلة نرى أنه عند ازدياد التردد تكون هناك حاجة إلى كثافة الكترونات أكبر أو زاوية إشعاع أصغر

إذا عوضنا في هذه المعادلة بدلاً من N القيمة N_{max} ، أي أكبر كثافة الكترونات موجودة في الجو المتأين تصبح المعادلة (٣-١٢) :

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{80.8 \cdot N_{\max}(1+2h/R)}{\sin^2\psi + 2h/R}} \qquad (١٣-٣)$$

حيث f_{max} هو أكبر تردد ينعكس في الجو المتأين ويعود إلى الأرض وذلك لزاوية ميل معينة أي لخط اتصال لاسلكي محدد. وكل تردد أكبر من f_{max} لا ينعكس في الجو المتأين بل يعبره ويذهب إلى الفضاء الخارجي.

تسمى f_{max} أقصى تردد يمكن استعماله MUF (*Maximal Usable Frequency*) وذلك لخط اتصال لاسلكي محدد.

أما إذا غيرنا قيمة زاوية إشعاع الهوائي ψ فيكون أكبر تردد يتم انعكاسه في الجو المتأين f_{max} عندما يتم الإشعاع من الهوائي بشكل أفقي، أي $\psi = 0$. عندها تصبح المعادلة (٣-١٣) :

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{80.8 \cdot N_{\max}(R+2h)}{2h}} \qquad (١٤-٣)$$

أما إذا جعلنا زاوية إشعاع الهوائي شاقولية، أي $\psi = \pi/2$ ، تصبح المعادلة(٣-١٣) :

$$f_0 = \sqrt{80.8 \cdot N_{\max}} \qquad (١٥-٣)$$

وتحدد المعادلة (٣-١٥) أعلى تردد يتم عكسه في الجو المتأين عند ورود الأمواج الكهرطيسية بشكل عمودي إليه. ويسمى هذا التردد " التردد الحدي " وعند ورود الأمواج الكهرطيسية إلى الجو المتأين بشكل مائل وليس عمودياً فيتم تحديد أعلى تردد يتم انعكاسه بواسطة المعادلة (٣-١٣).

مثال ٣-١:

المراد تحقيق خط اتصال لاسلكي بين نقطتين على سطح الأرض المسافة بينهما $r = 574km$.

المطلوب حساب أقصى تردد يمكن استعماله في هذا الخط إذا كانت $N_{\max} = 4 \cdot 10^6 el./cm^3$ موجودة على ارتفاع $h = 287\,km$ من سطح الأرض. نصف قطر الكرة الأرضية $R = 6.37 \cdot 10^6\,m$. نعتبر سطح الأرض بين نقطتي الاتصال اللاسلكي

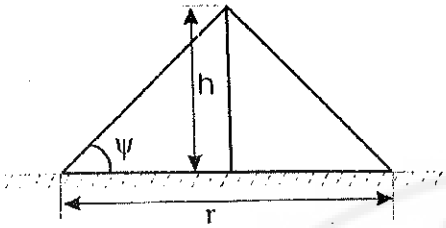
عند إجراء العمل الحسابي سطحاً مستوياً.

الحل:

من الشكل (٣-٥) يتبين أن:

$$\tan\psi = 1 \rightarrow \psi = 45^\circ \rightarrow \sin\psi = 0.707$$

بالتعويض في المعادلة (٣-١٣) نحصل على أقصى تردد يمكن استعماله MUF لخط الاتصال اللاسلكي.



الشكل (٣-٥): لتحديد زاوية إشعاع الهوائي ψ

$$f_{max} = \sqrt{\frac{80.8 \cdot N_{max}(1+2h/R)}{\sin^2\psi + 2h/R}} = \sqrt{\frac{80.8 \cdot 4 \cdot 10^6 \left[1+(2 \cdot 287 \cdot 10^3 / 6.37 \cdot 10^6)\right]}{0.5+(2 \cdot 287 \cdot 10^3 / 6.37 \cdot 10^6)}}$$

$$f_{max} = 24.42 \cdot 10^3\ KHz = 24.42\ MHz$$

مسألة ٣-٢:

يدور قمر اصطناعي حول الكرة الأرضية على ارتفاع $h = 400\ Km$ من سطح الأرض. حدد أدنى تردد يمكن استعماله لتأمين اتصال لاسلكي مع القمر الاصطناعي أطول فترة زمنية ممكنة.

ارتفاع الطبقة F_2 عن سطح الأرض $h = 300\ Km$.

كثافة الإلكترونات عند الظهيرة $N_{max} = 9.10^6 el./cm^3$

نصف قطر الكرة الأرضية $R = 6.37 \cdot 10^6 m$.

مسألة ٣-٣:

يتم تحقيق اتصال لاسلكي بين نقطتين على سطح الأرض في نهار أيام الصيف على التردد $f=20\ MHz$. المسافة بين نقطتي الاتصال $r = 600\ Km$ وارتفاع الطبقة F_2 عن سطح الأرض $h = 300\ Km$. في الليل تنخفض كثافة الالكترونات في الطبقة F_2 إلى $N_{max} = 3 \cdot 10^6 el./cm^3$.

هل يمكن العمل على هذا التردد ليلاً، ولماذا ؟

٣-٦ صفات طبقات الجو المتأين نتيجة المراقبة العملية

١- الطبقة D : وهي المنطقة المتأينة الواقعة على ارتفاع من ٦٠ إلى ٨٠ كيلومتراً من سطح الأرض. التردد الحدي للطبقة D هو بحدود $100\ KHz$ وهذا يكافئ كثافة الكترونات $N = 10^2 - 10^3 el./cm^3$. توجد الطبقة D في النهار وتسبب تخامداً شديداً للأشعة التي تنعكس فيها، وتختفي تماماً عند غياب الشمس وتتشكل مرة أخرى عند بزوغها. وتتعلق شدة تخميد الأشعة بتردد هذه الأشعة. ويزداد التخميد بانخفاض التردد ازدياداً كبيراً. بذلك يكون تأثير الطبقة D التخميدي على الأمواج القصيرة ضئيلاً. تقدر درجة الحرارة على ارتفاع ٨٠ كيلومتراً بـ $200 - 230^\circ K$.

٢- الطبقة E : وهي المنطقة المتأينة الواقعة على ارتفاع من ١٠٠إلى ١٤٠ كيلومتراً من سطح الأرض. التردد الحدي للطبقة E في الصيف ظهراً هو بحدود $4.5\ MHz$ وهذا يكافئ كثافة الكترونات بحدود $N = 2.5 \cdot 10^5 el./cm^3$ ، أما في الشتاء فيكون التردد الحدي بحدود $2\ MHz$.

ينخفض التردد الحدي للطبقة E عند غياب الشمس إلى $0.4\text{-}0.8\ MHz$ وهذا يكافئ كثافة الكترونات $N = 10^3 - 10^4 el./cm^3$ وتحافظ الطبقة E على كثافة الالكترونات هذه طوال الليل.

تتشكل الطبقة E نتيجة تأين جزئيات الأكسجين O_2 لأنه يعتقد أن ذرات الأكسجين O موجودة على ارتفاع أكبر من ١٤٠ كيلومتراً عن سطح الأرض.

تقدر درجة الحرارة في الطبقة E بـ $330^\circ K$.

٣- الطبقة F: تنقسم الطبقة F في نهار أيام الصيف إلى طبقتين هما الطبقة F_1 والطبقة F_2.

الطبقة F_1: تقع على ارتفاع من ٢٠٠ - ٢٢٠ كيلومتراً من سطح الأرض . التردد الحدي للطبقة F_1 في الصيف ظهراً هو بحدود 5,5 MHz وهذا يكافئ كثافة الكترونات $N = 3 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^5 el./cm^3$.

ولا توجد ظواهر على وجود هذه الطبقة في الليل وفي أيام الشتاء .

الطبقة F_2: يقع الحد الأقصى للتأين في هذه الطبقة على ارتفاع أكبر من ٢٨٠ كيلومتراً من سطح الأرض . التردد الحدي للطبقة F_2 في الصيف ظهراً هو بحدود 12 MHz وهذا يكافئ كثافة الكترونات $N = 3 \cdot 10^6 - 6 \cdot 10^6 el./cm^3$ ، والتردد الحدي في الليل هو

بحدود 3 MHz .

تكون الطبقة F_2 في الصيف أثخن منها بكثير في الشتاء .ويختلف ارتفاع هذه الطبقة في الصيف عنه في الشتاء . كذلك يتغير ارتفاعها بين النهار والليل إذ ينقص ارتفاع الحد الأقصى للتأين عن سطح الأرض عند المساء نتيجة اندماجها بالطبقة F_1 .

تتغير درجة الحرارة في الطبقة F_2 ما بين $1000^\circ K$ و $2000^\circ K$. وتؤدي الطبقة F_2 دوراً مهماً في انتشار الأمواج القصيرة بسبب درجة تأينها العالية .

الطبقة G : تتشكل أحياناً طبقة ضعيفة التأين فوق الطبقة F_2 تسمى الطبقة G ولا تؤثر هذه الطبقة في ظروف انتشار الأمواج الكهرطيسية .

٣-٧ تأثير الدورة الإحدى عشرة سنوية لنشاط الشمس على طبقات الجو المتأين

من المعروف بأن نشاط الشمس لا يبقى ثابتاً على مر السنين بل يخضع لتغيرات لها صفة الدورية. ويظهر تغير نشاط الشمس بالدرجة الأولى على شكل تغير في عدد الكلف أو البقع الشمسية وشدتها. ويمكن مراقبة عدد الكلف الشمسية بسهولة ويعبر عنه بما يسمى " العدد النسبي للكلف الشمسية " الذي يحدد بموجب المعادلة التالية:

$$R = K(f + 10 \cdot g) \qquad (٣-١٦)$$

حيث:

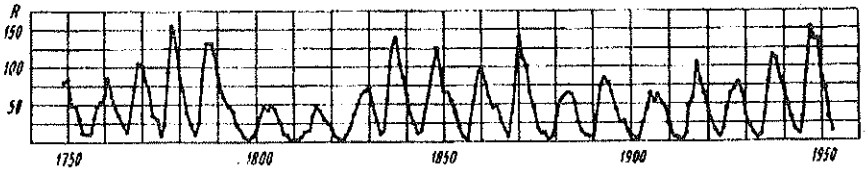
R العدد النسبي للكلف الشمسية.

g عدد مجموعات الكلف الشمسية الموجودة على نصف سطح الشمس المتجه للأرض.

f العدد الكلي للكلف الشمسية الموجودة على نصف سطح الشمس المتجه للأرض.

K عامل تصحيح حسب استطاعة المنظار المستعمل في مراقبة الكلف الشمسية.

تجري مراقبة الكلف الشمسية من قبل مرصد زيورخ "Zurich " منذ عام ١٧٤٩. وقد أظهرت هذه المراقبة أن R قد تغيرت منذ ذلك العام حتى الآن من $R=154.4$ عام ١٧٧٨ إلى $R=0.0$ عام ١٨١٠ وهما أعلى وأدنى قيمتين سجلتا خلال فترة المراقبة هذه. ويبين الشكل (٣-٦) تذبذب العدد النسبي للكلف الشمسية من عام ١٧٥٠ حتى عام ١٩٥٠. من شكل المنحني البياني يتبين بأن نشاط الشمس يتغير بشكل شبه دوري، ومدة كل دورة هي ١١,١ سنة بشكل متوسط مع انحرافات تصل إلى $\pm$ ٤ سنوات.



الشكل (٣-٦): تذبذب العدد النسبي للكلف الشمسية

ويبين الجدول (٣-٣) القيمة السنوية المتوسطة للعدد النسبي للكلف الشمسية من عام ١٩٣٣ حتى عام ١٩٥٤ حسبما سجلت من مرصد زيورخ.

تتأثر طبقات الجو المتأين بشكل أو بآخر بنشاط الشمس، وتؤثر الدورة الإحدى عشرة سنوية بشكل خاص في تأين الطبقة F_2. وقد تبين على سبيل المثال أن التردد الحدي للطبقة F_2 تضاعف مرتين من عام ١٩٣٣ حيث كان حداً أدنى لنشاط الشمس إلى عام ١٩٣٧ حيث كان حداً أقصى لنشاط الشمس، وهذا يكافئ مضاعفة كثافة الإلكترونات في هذه الطبقة أربع مرات. كذلك يرتبط ارتفاع الطبقة F_2 عن سطح الأرض بالدورة الإحدى عشرة سنوية لنشاط الشمس، إذ يكون ارتفاع منتصف هذه الطبقة في الحد الأقصى لعدد الكلف الشمسية النسبي أعلى منه في الحد الأدنى، وتزداد سماكة الطبقة F_2 في الحد الأقصى لعدد الكلف الشمسية.

الجدول (٣-٣) القيمة السنوية المتوسطة للعدد النسبي للكلف الشمسية

العام	R	العام	R
١٩٣٣	٥,٧	١٩٤٤	٩,٦
١٩٣٤	٨,٧	١٩٤٥	٣٣,٢
١٩٣٥	٣٦,١	١٩٤٦	٩٢,٦
١٩٣٦	٧٩,٧	١٩٤٧	١٥١,٦
١٩٣٧	١١٤,٤	١٩٤٨	١٣٦,٣
١٩٣٨	١٠٩,٦	١٩٤٩	١٣٤,٧
١٩٣٩	٨٨,٨	١٩٥٠	٨٣,٩
١٩٤٠	٦٧,٨	١٩٥١	٦٩,٤
١٩٤١	٤٧,٥	١٩٥٢	٣١,٥
١٩٤٢	٣٠,٦	١٩٥٣	١٣,٩
١٩٤٣	١٦,٣	١٩٥٤	٤,٤

يتغير أيضاً التردد الحدي للطبقة F_1 و E بتغير العدد النسبي للكلف الشمسية. ولوحظ أيضاً ازدياد تخميد الطبقة D للأمواج الكهرطيسية في الحد الأقصى لعدد الكلف الشمسية عنه في الحد الأدنى.

٣-٨ الطرق التي تسلكها الأمواج الكهرطيسية السماوية المرسلة من هوائي إرسال إلى الجو المتأين

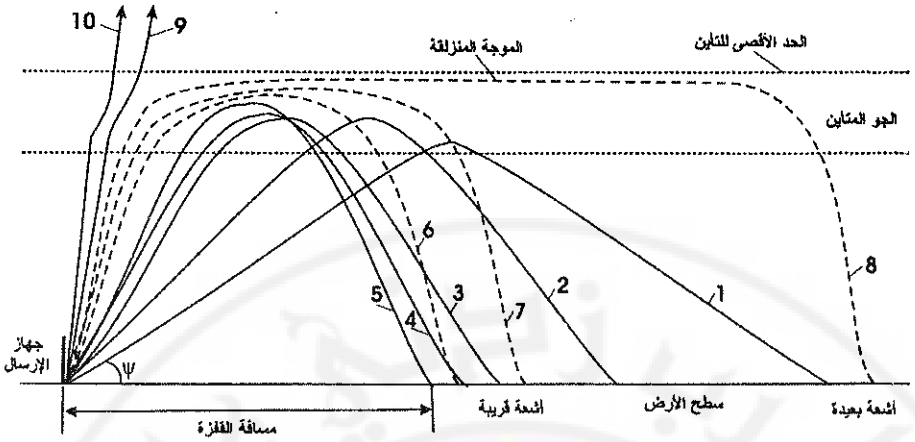
يبين الشكل (٣-٧) الطرق التي تسلكها مجموعة من أمواج سماوية مشعة من هوائي إرسال إلى الجو المتأين.

١- تدخل الموجة السماوية (١) والمشعة بزاوية ميل صغيرة ψ في الجو المتأين وتنعكس فيه وتعود إلى سطح الأرض لتصله على مسافة كبيرة من هوائي الإرسال.

٢- بازدياد زاوية ميل الإشعاع من الهوائي تقترب النقاط التي تصل إليها الأشعة من هوائي الإرسال (الأمواج ٢ حتى ٥). وينعكس الشعاع (٥) إلى أقرب نقطة من هوائي الإرسال، وتسمى المسافة بين هوائي الإرسال ونقطة وصول الشعاع (٥) على سطح الأرض " مسافة القفزة " . وتسمى الأشعة (٢) حتى (٥) " الأشعة القريبة " .

٣- كل الأشعة التي تتجه إلى الأعلى بزوايا ميل أكبر تخترق الجو المتأين إلى عمق أكبر وتقطع فيه مسافات أكبر من المسافات التي تقطعها الأشعة القريبة قبل أن تنعكس عائدة إلى سطح الأرض (الأمواج ٦-٧-٨)، وتسمى هذه الأشعة " الأشعة البعيدة ". وتتخامد الأشعة البعيدة أكثر من الأشعة القريبة بسبب الطريق الأطول الذي تقطعه في الجو المتأين وبسبب كثافة الإلكترونات الأكبر في أعالي الجو المتأين. ويسمى الشعاع (٨) " الشعاع المنزلق " نظراً لأنه ينزلق مسافة طويلة جداً في الحد الأقصى للتأين قبل أن يصادف عدم تجانس ما يسبب انكساره وعودته إلى سطح الأرض.

٤- يحدث للشعاعين (٩) و (١٠) تغيير بسيط فقط في اتجاه انتشارهما ضمن الجو المتأين، إذ عندما يصل هذان الشعاعان إلى منطقة الحد الأقصى للتأين لا تكون زاويتا انتشارهما قد بلغت الزاوية الحرجة α_c التي يحدث عندها الانعكاس الكلي. بذلك لا يعودان إلى سطح الأرض بل يتابعان طريقهما إلى الفضاء الخارجي الحر.



الشكل ٣-٧ : طرق انتشار الأمواج السماوية المشعة بزوايا ميل مختلفة

ويسمى أول شعاع يعبر الجو المتأين " الشعاع الحدي "، وهو في الشكل (٣-٧) الشعاع (٩)، وتسمى زاوية إشعاعه ψ_c " الزاوية الحدية ".

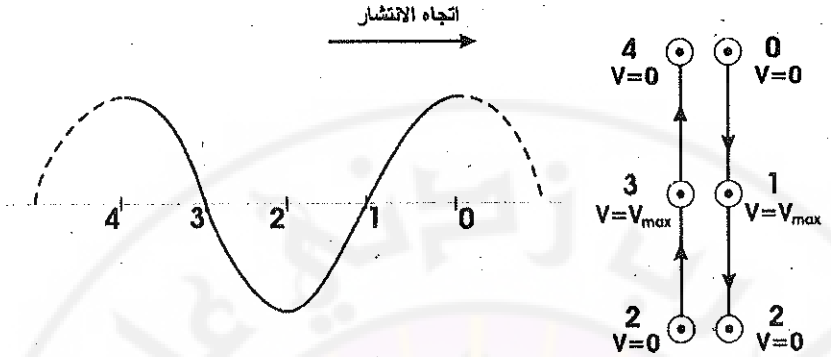
ومن المهم ملاحظة أنه يسري مفعول ما ذكر في الفقرات الأربعة السابقة على أمواج كهرطيسية لها نفس التردد. بنقصان هذا التردد يمكن أن ترد أشعة إلى الجو المتأين بزوايا ميل أكبر من الزاوية الحدية السابقة ψ_c وتنعكس فيه دون أن تعبره إلى الفضاء الخارجي. ويكون لهذه الأشعة زوايا حدية أكبر من الزاوية الحدية السابقة ψ_c كما يتضح من المعادلة (٣-١٣).

٣-٩ تخامد الأمواج السماوية في الجو المتأين

تتعرض الأمواج الكهرطيسية في الجو المتأين للتخامد بالإضافة إلى الانكسار والانعكاس اللذين تمت معالجتهما في المقطع (٣-٥). سبب التخامد هو أن الالكترونات والايونات الحرة الموجودة في الجو المتأين تتحرض للاهتزاز من قبل شعاع الحقل الكهربائي للموجة الواردة. ولتوضيح عملية الاهتزاز هذه بسهولة نفترض بأن هناك إلكتروناً واحداً سرعته في لحظة ورود الموجة مساوية للصفر (النقطة O في الشكل ٣-٨).

بدءاً من هذه النقطة تبتدئ الموجة بجذب الإلكترون السالب بتأثير حقلها الكهربائي الموجب E، وتستمر عملية جذب الإلكترون حتى النقطة 1 من الموجة. عندها تصبح قيمة الحقل الكهربائي مساوية للصفر وتصبح سرعة الإلكترون وقدرته الحركية أكبر ما يمكن

($V = V_{max}$). ويأخذ الإلكترون خلال الربع الأول من الموجة نتيجة انجذابه من الحقل الكهربائي جزءاً من قدرة الموجة الكهرطيسية ويحولها إلى قدرة حركية.



الشكل (٣-٨): لتوضيح اهتزاز حوامل الشحنات بتأثير الحقل الكهربائي للموجة الكهرطيسية

في الربع الثاني من الموجة وبدءاً من النقطة 1 يبطئ الحقل الكهربائي السالب $E-$ حركة الإلكترون نتيجة تنافره له حتى تصبح سرعته وقدرته الحركية في النقطة 2 مساويتين للصفر ($V = 0$) . بذلك يعيد الإلكترون في الربع الثاني من الموجة القدرة التي أخذها منها في الربع الأول.

في الربع الثالث من الموجة (من النقطة 2 حتى 3) يستمر تنافر الإلكترون من الحقل الكهربائي السالب $E-$ وتزداد سرعته في الاتجاه المعاكس وكذلك قدرته الحركية حتى تصبحا في النقطة 3 أكبر ما يمكن ($V = V_{max}$) . بذلك يأخذ الإلكترون خلال هذا الربع جزءاً من قدرة الموجة ويحولها إلى قدرة حركية.

في الربع الرابع من الموجة (من النقطة 3 حتى 4) يبطئ الحقل الكهربائي الموجب $E+$ حركة الإلكترون نتيجة جذبه له حتى تصبح سرعته وقدرته الحركية مساويتين للصفر ($V = 0$) . بذلك يعيد الإلكترون في الربع الرابع من الموجة القدرة التي أخذها منها في الربع الثالث.

وتتكرر هذه العملية في كل دورة من دورات الموجة. وتحدث عملية تبادل قدرة مشابهة بين الحقل الكهربائي للموجة والايون الموجب خلال عملية التنافر والانجذاب .

بذلك لا تخسر الموجة أية قدرة كهرطيسية خلال كل دورة كاملة . ولكن الذي يحدث فعلاً هو أن الإلكترونات والايونات تتصادم خلال اهتزازها مع جزئيات الغاز المجاورة وتفقد بذلك

جزءاً من قدرتها الحركية المأخوذة من الحقل الكهربائي للموجة. ويتحول هذا الجزء من القدرة الحركية والمفروض إعادته إلى الموجة إلى قدرة حرارية. وهذا يعني بالنسبة للأمواج الكهرطيسية تخامد شدة حقولها.

وكما سنرى لاحقاً يزداد التخامد طرداً مع مربع طول الموجة. لذلك يكون تخامد الأمواج الطويلة والمتوسطة أحياناً كبير بشكل أن هذه الأمواج تمتص كلياً في الجو المتأين. والسبب هو أن دور الموجة الكبير للأمواج الطويلة والمتوسطة يزيد من احتمال تصادم الإلكترونات والايونات مع جزيئات الغاز المجاورة في الدورة أو الهزة الواحدة.

ويحدث إضعاف الأمواج الكهرطيسية بشكل خاص إذا زادت درجة التأين لطول موجة ما عن حد معين نظراً لأن احتمال التصادم وبالتالي التخامد يزداد بزيادة كثافة الإلكترونات.

تخسر الأشعة البعيدة وبالذات الشعاع رقم (٨) في الشكل (٣-٧) قدرة كبيرة نظراً لأنها تدخل إلى عمق الطبقات المتأينة وتقطع فيها مسافات كبيرة. أما الأشعة القريبة الواردة إلى الجو المتأين بزوايا ميل صغيرة، وبالذات الشعاع رقم (١) في الشكل (٣-٧)، والتي تخترق الجو المتأين إلى عمق ضئيل فقط فلا تخسر الكثير من قدرتها.

وعلى سبيل المثال أحد أسباب عدم إمكانية استقبال الأمواج المتوسطة كأمواج سماوية في النهار هو التخامد الشديد الذي تتعرض له في الطبقة E ذات التأين الشديد، إضافة إلى وجود الطبقة D تحت الطبقة E والتي تمتص الأمواج المتوسطة بشدة ولا تعكسها. عند ابتداء ظلمة الليل يخف تأين الطبقة E وتزول الطبقة D ويصبح بالإمكان استقبال الأمواج المتوسطة كأمواج سماوية.

٣-١٠ ظاهرة الخفوت

المقصود بالخفوت هو تغير شدة الحقل المستقبلة في نقطة ما على سطح الأرض بمرور الزمن. ويلاحظ ذلك بشكل واضح على شكل تغير شدة الصوت في أجهزة الاستقبال على الرغم من وجود التغذية العكسية فيها (AGC) . ويمكن أن يؤدي الخفوت إلى اختفاء الصوت كلياً لفترة زمنية ما. كما يسبب غالباً تشويه شديد لشكل الإشارات المستقبلة.

السبب الرئيسي للخفوت هو تداخل موجتين (أو أكثر) تصلان إلى منطقة الاستقبال بعد اشعاعهما من نفس الهوائي وقطعهما طريقين مختلفين. بذلك تستغرقان في مسيرهما زمنين مختلفين وهذا ما ينجم عنه وجود فرق في زاوية الطور بين الموجتين. ولو كان الجو المتأين

وسطاً ثابتاً لا تتغير صفاته بمرور الوقت لبقي الفرق بين زاويتي طور الشعاعين المتـداخلين ثابت أيضاً، ويكون مطال محصلة الشعاعين المتداخلين ثابتاً ولا يوجد خفوت. لكن في الحقيقة يتعرض الجو المتأين بسبب تركيبه الغيمي إلى تغير كثافة حوامل الشحنات فيـه باسـتمرار، وبالتالي تغير ارتفاع نقاط الانعكاس فيه بشكل عشوائي، مما يؤدي إلى تغير في طول الطريق الذي يقطعه كل من الشعاعين المتداخلين باستمرار، وبذلك يتغير الفرق بين زاويتي طورهما ويتغير مطال محصلتهما باستمرار مما يسبب الخفوت. ويسبب تغير طول طريـق الموجـة السماوية بمقدار Δr تغير في زاوية طورهما مقداره:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot\Delta r \qquad (٣-١٧)$$

نميز بين نوعين من الخفوت :

١- الخفوت القريب : وينجم عن تداخل موجة سماوية (أو أكثر) مع موجة أرضية في نقطة ما على سطح الأرض، حيث تتغير زاوية طور الموجة السماوية بشكل عشوائي، مما يـؤدي إلى تغير الفرق بين زاويتي طورهما وبالتالي تغير مطال محصلتهما باستمرار.

٢- الخفوت البعيد : وينجم عن تداخل موجتين سماويتين (أو أكثر) في نقطة ما على سطح الأرض، حيث تتغير زاوية طور كل منهما بشكل عشوائي، مما يؤدي إلى تغير الفرق بـين زاويتي طورهما وبالتالي تغير مطال محصلتهما باستمرار. ويكون الخفوت كلياً إذا تـداخلت موجتان متساويتان في الشدة ومختلفتان في زاوية الطور بمقدار 180°

الفصل الرابع

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

٤- انتشار الأمواج الطويلة جداً

٤-١ معالجة عامة لانتشار الأمواج الطويلة جداً

الأمواج الطويلة جداً *VLW* (*Very Long Wave*) وتسمى أيضاً الترددات المنخفضة جداً *VLF* (*Very Low Frequency*) هي الأمواج الكهرطيسية المحددة بالمجال الترددي $f=10\ ..\ 30KHz$ ($\lambda = 30..10Km$). وكان من المستحب استعمال هذه الأمواج لنقل لمعلومات لاسلكياً إلى مسافات كبيرة نظراً لأنها تؤمن ظروف استقبال مستقرة، وذلك شريطة أن تكون استطاعة الإرسال كبيرة بما فيه الكفاية. وقد استعملت الأمواج الطويلة جداً لتأمين الاتصالات اللاسلكية عبر القارات قبل معرفة المدى الذي تصل إليه الأمواج القصيرة نتيجة انعكاساتها المتعددة بين الجو المتأين وسطح الأرض.ولكن لاستعمال الأمواج الطويلة جداً مساوئ عديدة أهمها:

١- المقاييس الكبيرة للهوائيات ولا سيما إذا كانت موجهة.

٢- الارتفاع الفعال للهوائيات ضئيل وبالتالي مردودها منخفض.

٣- التأثر الشديد بالتشويش الجوي والعواصف الرعدية.

٤- التشويش المتبادل بين أجهزة الإرسال التي تعمل على نفس التردد.

٥- المجال الترددي المتوفر ضيق ولا يتسع إلا لعدد ضئيل من ترددات خطوط الاتصال اللاسلكي.

يكفي لانعكاس الأمواج الطويلة جداً في الجو المتأين كثافة الكترونات ضئيلة حيث يتم انعكاسها في الحدود الدنيا للجو المتأين ولو وردت إليه بشكل مسطح، أي بزاوية ميل صغيرة (في الطبقة D نهاراً وفي الطبقة E ليلاً). ويمكن اعتبار الحدود الدنيا للجو المتأين حدوداً غير قابلة للاختراق بسبب طول الموجة الكبير. وبما أن ارتفاع سطح الانعكاس عن سطح الأرض قريب من طول الموجة يتم انتشار الأمواج الطويلة جداً في مجال ضيق نسبياً ومحدد بسطحين لمرشد أمواج كروي أحدهما سطح الأرض والآخر الحدود الدنيا للجو المتأين. وتتداخل في هذا المجال الأمواج المعكوسة من السطحين منتجة تيار قدرة يتجه باتجاه انحناء سطح الأرض كما هو مبين في الشكل (٤-١).

إذا حاولنا تقدير الصفات الكهربائية للحدود الدنيا للجو المتأين بالنسبة للأمواج الطويلة جداً نتوصل إلى مايلي:

بموجب المقطع (٣-٦) افترض أن كثافة الإلكترونات في الطبقة D نهاراً هي $N \approx 10^3 el./cm^3$ وعدد تصادمات الإلكترونات هو $\nu = 10^7 - 10^8 [s^{-1}]$. بالنسبة للحدود الدنيا للطبقة E تكون $N \approx 500 el./cm^3$ و $\nu = 10^5 [s^{-1}]$. بتطبيق المعادلتين التاليتين الخاصتين بحساب ثابت العازلية الكهربائية العقدية النسبي والناقلية النوعية في الجو المتأين :

$$\varepsilon_{ri} = 1 - 3190 \cdot \frac{N}{\omega^2 + \nu^2} \qquad (١-٤)$$

$$\sigma_i = 2.82 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{N \cdot \nu}{\omega^2 + \nu^2} \quad [\frac{1}{\Omega \cdot m}] \qquad (٢-٤)$$

نحصل على مايلي:

١- الطبقة D : عند الانعكاس على الطبقة D نهاراً نحصل على القيمتين التاليتين لـ ε_{ri} و σ_i لكامل مجال الأمواج الطويلة جداً، حيث $\nu^2 >> \omega^2$.

$$\varepsilon_{ri} \approx 1 - 1.3 \cdot 10^{-3} \approx 1 \qquad \sigma_i = 6 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\Omega \cdot m}$$

وبموجب المعادلة (١-٥٩) التي تحدد نسبة تيارات الانزياح إلى تيارات النقل:

$$\frac{i_v}{i_l} = \frac{\varepsilon_r}{60 \cdot \lambda \cdot \sigma}$$

نحصل بالنسبة لبداية ونهاية مجال الأمواج الطويلة جداً على القيمتين التاليتين لهذه النسبة.

$$\lambda = 20000m \rightarrow \frac{i_v}{i_l} \approx 1.4 \qquad \lambda = 3000 \rightarrow \frac{i_v}{i_l} \approx 9.3$$

ان الوسط الذي يمتلك مثل هاتين القيمتين المميزتين هو وسط نصف ناقل صفاته قريبة قليلاً من العازل، وناقلية هذا الوسط هي أصغر بألف مرة تقريباً من ناقلية أسوأ أنواع الأرض (الرمل الجاف).

٢- الطبقة E : عند الانعكاس على الطبقة E ليلاً نحصل على القيمتين التاليتين لـ ε_{ri} و σ_i لطول الموجة $\lambda = 20000m$:

$$\varepsilon_{ri} < 1 \qquad \sigma_i \approx 7 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\Omega \cdot m}$$

وتبين النتيجة $\varepsilon_{ri} < 1$ أن الأمواج الطويلة جداً تنعكس على الحدود الدنيا للطبقة E انعكاساً كلياً، وذلك على ارتفاع من سطح الأرض تكون فيه:

$$\varepsilon_{ri} = \sin^2 \varphi_0 \qquad (٣-٤)$$

وهذا الارتفاع هو أقل بكثير من ارتفاع منطقة التأين الأعظمي في الطبقة E . بموجب الشكل (٤-٢) تكون زاوية ورود الأشعة المسطحة φ_0 (عندما يكون الإشعاع أفقياً) إلى الحدود الدنيا للطبقة E الليلية $(h \approx 95Km)$:

$$\sin \varphi_0 \approx \frac{R}{R+h} \approx 1 - \frac{h}{R} = 1 - 1.5 \cdot 10^{-2} \qquad (٤-٤)$$

وبفرض أن $\nu \approx 10^5 s^{-1}$ نحصل على كثافة الإلكترونات التي تسبب انعكاساً كلياً لطول الموجة $\lambda = 20000m$ بالشكل التالي:

نعوض قيمة φ_0 (المعادلة ٤-٤) والمعادلة (٤-١) في المعادلة (٤-٣) ونهمل الحد $2.25 \cdot 10^{-4}$ فنحصل:

$$\varepsilon_{ri} \approx 1 - 3 \cdot 10^{-2} = 1 - 3190 \cdot \frac{N}{\omega^2 + \nu^2}$$

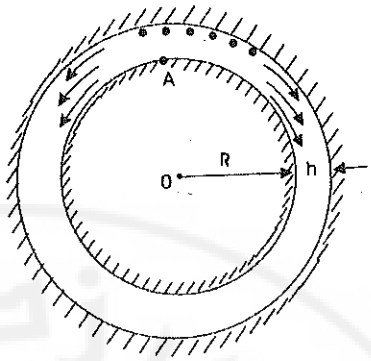
منه تكون

$$N \approx 0.2 \quad el./cm^3$$

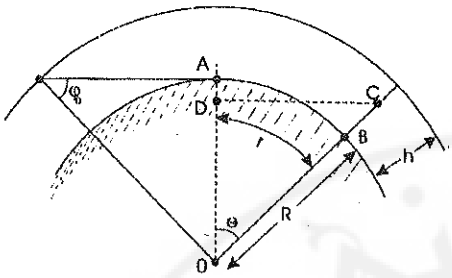
مما سبق يتبين أن كثافة إلكترونات صغيرة جداً بحدود $1el./cm^3$ تكفي لحدوث الانعكاس الكلي للأمواج الطويلة جداً، كذلك يتبين أن شرط الانعكاس الكلي لهذه الأمواج يحدد بالدرجة الأولى بعدد التصادمات.

تظهر دراسة نوع استقطاب الأمواج الطويلة جداً والمنعكسة في الجو المتأين أن هذه الأمواج مستقطبة استقطاب قطع ناقص، ولا يمكن أن يحدث ذلك إلا بتأثير الحقل المغناطيسي للأرض.

للدراسة النظرية لانتشار الأمواج الطويلة جداً تبين أنه من الأجدى تطبيق نظرية رباعيات الأقطاب ونظرية مرشدات الأمواج على مرشد الأمواج الكروي المبين في الشكل (٤-١). والصفة الغريبة لهذا المرشد بغض النظر عن شكله غير المألوف في مرشدات الأمواج أو بشكل أصح في الطنانات هي أن صفات سطحه الداخلي (سطح الأرض) بالنسبة للأمواج الطويلة جداً هي صفات نصف الناقل القريبة من الناقل، بينما صفات سطحه الخارجي (بداية الجو المتأين) هي صفات العازل تقريباً.



الشكل(٤-١): لدراسة انتشار الأمواج الطويلة جداً في مرشد الأمواج المحدد بسطح الأرض والجو المتأين.



الشكل(٤-٢): لتحديد تيار القدرة عند انتشار الأمواج الطويلة جداً.

٤-٢ معالجة حالة انتشار مبسطة

بما أن المعالجة الدقيقة لحالات الانتشار المناقشة فيما سبق وكذلك البحث في كيفية نشوء الاهتزازات مصحوبتان بصعوبات رياضية كبيرة نكتفي هنا بمعالجة حالة انتشار مبسطة انطلاقاً من الشرطين التبسيطيين التاليين:

١- نفترض أن سطح الأرض والحدود الدنيا للجو المتأين هما عاكسان مثاليان للأمواج الطويلة جداً.

٢- نفترض أن تيار قدرة الأمواج المنتظم والناجم عن تداخل أشعة كثيرة مختلفة لا يتعلق بالارتفاع عن سطح الأرض وذلك بدءاً من مسافة كبيرة بما فيه الكفاية من جهاز الإرسال.

إذا رمزنا للاستطاعة المشعة من هوائي الإرسال A بـ P (الشكل ٤-٢) وراعينا أن الهوائيات المستعملة في مجال الأمواج الطويلة جداً هي غالباً غير موجهة ($G=1$) نحصل على الشكل التالي للقيمة المطلقة لشعاع بوينتغ في النقطة B (انظر المعادلة ١-١).

$$S = \frac{P}{F} \qquad (٥-٤)$$

حيث F السطح الذي تتوزع عليه قدرة الموجة، وهو السطح الجانبي لمخروط دوراني محوره OA ووتره OC، وهو مغلق من الأعلى بسطح كرة نصف قطرها $R+h$ (الجو المتأين) ومن الأسفل بسطح كرة نصف قطرها R (سطح الكرة الأرضية). وبما أن $h<<R$ يمكن اعتبار السطح F هو حاصل جداء محيط دائرة نصف قطرها القيمة المتوسطة DC بطول جزء من الوتر يساوي الارتفاع h .

$$F = 2\pi(CD)\cdot h = 2\pi(R+\frac{h}{2})\cdot h\cdot\sin\theta \qquad (٦-٤)$$

بتعويض قيمة F هذه في المعادلة (٤-٥)، وبالتعبير عن S بشدة الحقل E بموجب المعادلة (٤-١) نحصل:

$$S = \frac{P}{2\pi(R+\frac{h}{2})\cdot h\cdot\sin\theta} = \frac{E^2}{120\pi} \qquad (٧-٤)$$

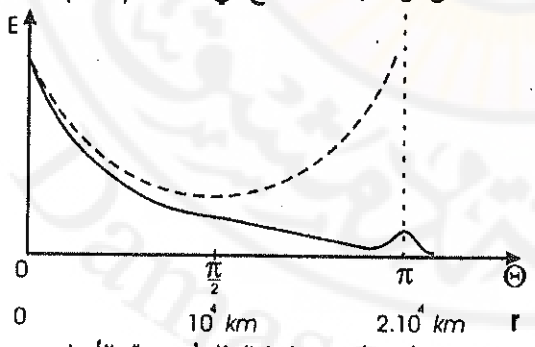
$$E = \frac{\sqrt{60P}}{\sqrt{(R+\frac{h}{2})\cdot h\cdot\sin\theta}} \qquad (٨-٤)$$

حيث تعوض كل القيم في هذه المعادلة بالجملة المكثية (*MKS-System*) .

بدمج كل القيم الثابتة في المعادلة (٤-٨) بثابت واحد نرمز له بالحرف k يمكن كتابة هذه المعادلة بالشكل التالي:

$$E = k\cdot\sqrt{\frac{P}{\sin\theta}} \qquad (٩-٤)$$

إن هذه المعادلة غريبة في شكلها لأنها تعطي علاقة غير مألوفة لشدة الحقل بالمسافة. من هذه المعادلة نرى أنه بازدياد المسافة من $r = 0$ إلى $r = 10000Km$ (تكافئ $\theta = 0$ إلى $\theta = \pi/2$) يكبر مخرج المعادلة (٤-٩)، أي تنخفض شدة الحقل. بالاستمرار في زيادة المسافة يصغر $\sin\theta$ ويصبح عند المسافة $R = 2000Km$ (عند القطب المقابل) مساوياً للصفر. بذلك تنتج علاقة شدة الحقل بالمسافة المرسومة بخط متقطع في الشكل (٤-٣).



الشكل (٤-٣): تغير شدة الحقل في مجال الأمواج الطويلة جداً بعلاقة المسافة r على سطح الأرض.

وهذا يعني أن الأمواج تلتقي في القطب المقابل بعد دورانها في جميع الاتجاهات حول الكرة الأرضية. وبما أننا لم نراع الضياع أثناء الانتشار في المعادلة (٤-٩) ينتج في القطب المقابل نفس تيار القدرة الموجود بالقرب من جهاز الإرسال مباشرة.

في الحقيقة تتعرض الأمواج الكهرطيسية خلال انتشارها إلى تخميد شديد إذ يتم امتصاصها عند انعكاسها على سطح الأرض وفي الجو المتأين. كذلك يتم امتصاصها من الغازات ذات التأين الضعيف والموجودة تحت طبقة الجو المتأين العاكسة، وقد أشير لهذه المنطقة في الشكل(٤-١) بنقاط متعددة. عند مراعاة التخميد نحصل على تغير شدة الحقل الممثل بالخط المستمر في الشكل (٤-٣).ويحدث هنا أيضاً ارتفاع ما في شدة الحقل في منطقة القطب المقابل، وقد تم التأكد عملياً من وجود هذا الارتفاع في شدة الحقل.

٤-٣ خواص انتشار الأمواج الطويلة جداً

كما ورد سابقاً تتميز الأمواج الطويلة جداً بظروف انتشار مستقرة جداً. نورد فيما يلي الظواهر التي تمت مراقبتها عملياً عند انتشار هذه الأمواج على مسافات كبيرة والناجمة عن وجود الجو المتأين.

١- تغير شدة الحقل المستقبلة خلال فترات زمنية قصيرة (الخفوت)

توجد في مجال الأمواج الطويلة جداً أيضاً ظواهر الخفوت، إلا أنها تحدث بشكل أبطأ بكثير مما هو عليه الحال في مجال الأمواج المتوسطة والقصيرة. وكما ورد في المقطع (٣-١٠) تتعرض كثافة الإلكترونات في نقطة الانعكاس لبعض التغيرات باستمرار بسبب عدم التجانس في الجو المتأين. بذلك يتغير ارتفاع نقطة الانعكاس باستمرار وتتغير نتيجة ذلك زوايا طور الأشعة المتداخلة، وهذا ينجم عنه تغير شدة الحقل في منطقة الاستقبال. ولكي تتغير زاوية طور أحد الشعاعين المتداخلين بمقدار 180^0 يجب أن يكون الفرق في المسافة التي يقطعها كل من الشعاعين مساوياً لنصف طول الموجة، أي $1.5Km$ عندما يكون طول الموجة $\lambda = 3000m$ و $10Km$ عند $\lambda = 20000Km$. وواضح بأنه لا يمكن أن تحدث مثل هذه التغيرات الكبيرة في ارتفاع نقطة الانعكاس خلال فترات زمنية قصيرة. وتحدد هذه الحقيقة الصفة المميزة لتغيرات شدة الحقل في مجال الأمواج الطويلة جداً. وتمتلك هذه التغيرات في شدة الحقل عمق خفوت ضئيل، وتحدث ببطء شديد بحيث يتعذر تمييزها عن طريق الاستقبال السمعي للإشارات اللاسلكية، ولا يمكن التأكد من وجودها إلا عن طريق قياس شدة الحقل. وتكبر تغيرات شدة الحقل بصغر طول الموجة.

بشكل عام تتغير شدة الحقل في مجال الأمواج الطويلة جداً وخلال فترات زمنية قصيرة من 10 % إلى 30 % ويتراوح زمن هذا التغير بين عشرات الدقائق والساعات.

٢- تغير شدة الحقل المستقبلة بتغير أوقات اليوم

بحلول الظلام تزداد شدة الحقل، وتكون هذه الزيادة أكبر كلما صغر طول الموجة. سبب اختلاف شدة الحقل باختلاف أوقات اليوم هو صفات الانعكاس المختلفة باختلاف أوقات اليوم. وتسبب الطبقة D نصف الناقلة والموجودة في النهار ضياعاً كبيراً عند الانعكاس، بينما تسبب الطبقة E التي هي عملياً غير ناقلة امتصاصاً ضئيلاً لا يذكر في الليل. كما أنه من المحتمل أن يؤدي الامتصاص في المنطقة المتأينة تأيناً ضعيفاً والموجودة تحت طبقة الانعكاس النهارية مباشرة دوراً ما في ذلك.

ويسبق ازدياد شدة الحقل عند الانتقال من النهار إلى الليل بشكل أو بآخر حد أدنى عميق لشدة الحقل. ويكون هذا الحد الأدنى أكبر ما يمكن في الأمواج القصيرة من مجال الأمواج الطويلة جداً، وينعدم تقريباً بازدياد طول الموجة. سبب تأثير المغيب هذا هو بالدرجة الأولى الامتصاص الانتقائي للطبقة D المنحلة.

لقد تبين من خلال مراقبات إنكليزية على التردد $16\ KHz$ وعلى مسافات قريبة من جهاز الإرسال أن ارتفاع الانعكاس ينزاح عند الانتقال من النهار إلى الليل من $70\text{-}75\ Km$ (الطبقة D) إلى $90\ Km$ (الحدود الدنيا للطبقة E)، كما تبين أن ثابت الانعكاس في الليل أكبر منه في النهار. وبينت هذه المراقبات أيضاً أن التغير في ارتفاع الانعكاس عند الفجر والمغيب يسبب تغيراً كبيراً في الفرق بين زاوية طور الموجة الأرضية والموجة السماوية.

٣- تغير شدة الحقل المستقبلة بتغير فصول السنة

تتغير شدة الحقل في مجال الأمواج الطويلة جداً بتبدل فصول السنة تغيراً ضئيلاً. ويظهر هذا التغير على شكل ازدياد شدة حقل الأمواج السماوية خلال ساعات النهار في الصيف بالمقارنة مع شدة حقل الأمواج السماوية خلال ساعات النهار في الشتاء بمقدار $\%\ 20\text{-}50$. ويحدث عكس ذلك في الليل إذ تكون شدة الحقل في ساعات ليل أشهر الصيف أقل من شدة الحقل في ساعات ليل الشتاء. سبب هذه الظاهرة هو أن مدة ليل الصيف القصير لا تكفي لتلاشي كل حوامل الشحنات الماصة والموجودة تحت مستوى الانعكاس مباشرة.

٤- تأثير الدورة الإحدى عشرة سنوية لنشاط الشمس على شدة الحقل المستقبلة

ليس لتأثير الدورة الإحدى عشرة سنوية لنشاط الشمس على حوادث انتشار الأمواج الطويلة جداً أهمية تذكر. وتزداد شدة الحقل النهارية بشكل ما بارتفاع العدد النسبي للكلف الشمسية.

وقد لوحظ مضاعفة شدة الحقل النهارية في حالات إفرادية عند الانتقال من الحد الأدنى إلى الحد الأقصى لنشاط الشمس. ويمكن تفسير هذه الظاهرة بأن ازدياد كثافة حوامل الشحنات في الطبقة D النهارية يسبب تحسن ناقلية هذه الطبقة وبالتالي تحسن ظروف الانعكاس.

٤-٤ طرق حساب شدة الحقل في مجال الأمواج الطويلة جداً

يمكن حساب شدة حقل الموجة الأرضية في منطقة الاستقبال حتى بضع مئات الكيلومترات من هوائي الإرسال بموجب المعادلة (٢-١٧) الموضوعة من قبل "*Van der pol*" ، أي قبل أن يتشكل تيار القدرة المنتظم الذي ينتشر ضمن مرشد الأمواج الكروي.

لحساب شدة الحقل على مسافات أكبر يجب مراعاة الأمواج السماوية بالإضافة إلى الأمواج الأرضية.

تستعمل في حساب شدة الحقل في مجال الأمواج الطويلة جداً (كما هي الحال في حالات عديدة أخرى) معادلات تجريبية توضع انطلاقاً من الخبرة العملية في مجال انتشار الأمواج الكهرطيسية (*empirical equation*). أكثر هذه المعادلات انتشاراً واستخداماً هي معادلة "*Austin* " (معادلة ٤-١٠)، والتي وضعها بعد إجراء قياسات عملية كثيرة جداً. وتحدد هذه المعادلة شدة الحقل اليومية عند الانتشار فوق سطح البحر. أما عند الانتشار فوق الأرض اليابسة فيمكن استعمالها لمسافات أكبر من Km 2000-3000 وتكون صالحة حتى مسافات Km 16000-18000 من هوائي الإرسال حسب نوع الأرض.

عند معرفة استطاعة جهاز الإرسال يستعمل الشكل التالي للمعادلة:

$$E_{eff} = \frac{300\sqrt{P_{/KW}}}{r_{/Km}} \cdot \sqrt{\frac{\theta}{\sin\theta}} \cdot e^{\frac{-0.0014}{\lambda_{/Km}^{0.6}} \cdot r_{/Km}} \left[mV/m\right] \qquad (٤-١٠-أ)$$

أما عند معرفة صفات الهوائي فيستعمل الشكل التالي للمعادلة:

$$E_{eff} = \frac{120\,\pi \cdot h_{eff\,/\,m} \cdot I_{/A}}{\lambda_{/m} \cdot r_{/Km}} \cdot \sqrt{\frac{\theta}{\sin\theta}} \cdot e^{\frac{-0.0014}{\lambda_{/Km}^{0.6}} \cdot r_{/Km}} \left[mV/m\right] \qquad (٤-١٠-ب)$$

حيث

P استطاعة جهاز الإرسال بالكيلوواط

r المسافة بين منطقة الإرسال ومنطقة الاستقبال بالكيلومتر

θ الزاوية المركزية المكافئة للمسافة r

λ طول الموجة بالمتر، وفي الأس بالكيلومتر

I التيار في قاعدة الهوائي بالأمبير

ونلاحظ هنا أن القيمة $\sqrt{\sin\theta}$ موجودة في مخرج المعادلتين (٤-١٠) كما هي الحال في المعادلة النظرية المشتقة فيما سبق (معادلة ٤-٩).

من المعادلة (٤-١٠) يتبين أنه لمسافة معينة يوجد طول موجة أنسب نحصل عند استعماله على قيمة عظمى لشدة الحقل في منطقة الاستقبال. وبافتراض أن طول الهوائي الفعال لا يتعلق بطول الموجة، وبافتراض أنه تم تثبيت قيمة تيار الهوائي، يمكن عن طريق اشتقاق المعادلة (٤-١٠) وحساب المعادلة $\frac{\partial E}{\partial \lambda} = 0$ تحديد تردد التشغيل الأنسب الذي ينتج أكبر شدة حقل في منطقة الاستقبال. السبب الفيزيائي لوجود قيمة عظمى لشدة الحقل هو أنه من جهة تنخفض الاستطاعة المشعة من الهوائي بازدياد طول الموجة ومن جهة أخرى ينخفض الضياع أثناء الانتشار بانخفاض التردد. بازدياد المسافة من جهاز الإرسال يزداد طول موجة التشغيل الأنسب. في ظروف التشغيل العملية لا يبقى التيار I ثابتاً لأن المقاومة الإشعاعية للهوائي تتعلق بالتردد. إضافة إلى ذلك فإن العامل الحاسم في تحديد جودة الاستقبال هو نسبة جهد الإشارة إلى جهد الضجيج فقط. من هذا المنطلق نحدد طريقة اختيار طول موجة التشغيل الأنسب.

ونذكر هنا أن مقاييس الهوائيات في مجال الأمواج الطويلة جداً أصغر بكثير من طول الموجة ($\lambda = 30.000 - 10.000m$)، بذلك من غير العملي تغيير مقاييس الهوائي عند تغيير طول موجة التشغيل.

بافتراض أن الاستطاعة المقدمة إلى الهوائي في المجال الترددي المراد مناقشته لا تتغير، نحسب أولاً الاستطاعة المشعة من الهوائي أو تيار الهوائي. بعدها نحسب بواسطة المعادلة (٤-١٠) شدة الحقل في منطقة الاستقبال لعدد من قيم طول الموجة في مجال الأمواج الطويلة جداً. يمكن الآن وبعد معرفة علاقة مستوى الضجيج بطول الموجة حساب نسبة جهد الإشارة إلى جهد الضجيج. منه نختار طول الموجة الذي تأخذ عنده هذه النسبة قيمة عظمى كتردد التشغيل الأنسب.

مثال ٤-١:

لدينا جهاز إرسال استطاعته KW 400 (الاستطاعة المقدمة إلى الهوائي). علاقة مردود هوائي الإرسال بالتردد، أي نسبة الاستطاعة المشعة من الهوائي إلى الاستطاعة المقدمة من جهاز الإرسال، مبينة في الجدول(٤-١) لعدد من الترددات في المجال الترددي f= 15-80 KHz . نود تحقيق خط اتصال لاسلكي طوله Km 8000 . المطلوب:

١- حساب الاستطاعة المشعة من الهوائي.

٢- حساب شدة الحقل المنتجة في منطقة الاستقبال

٣- حساب نسبة مستوى الإشارة إلى مستوى الضجيج في منطقة الاستقبال(مستوى الضجيج مبين في الجدول ٤-١).

٤- إدراج القيم المحسوبة في جدول.

٥- تحديد تردد التشغيل الأنسب.

الجدول ٤-١: مردود الهوائي ومستوى الضجيج لعدد من الترددات

التردد f [KHz]	١٥	٢٠	٣٠	٤٠	٦٠	٨٠
مردود الهوائي η [%]	٧,٩	١٤	٢٦	٤٣	٤٧	٥٠
مستوى الضجيج في منطقة الاستقبال $[\mu V/m]$	٤٠	٣٠	٢٥	١٨	١٠	٥

الحل:

١- حساب الاستطاعة المشعة من الهوائي.

تساوي الاستطاعة المشعة من الهوائي حاصل ضرب الاستطاعة المقدمة إلى الهوائي بمردود الهوائي

$$P = P_{imp} \cdot \eta$$

نحسب قيم الاستطاعة المشعة للترددات الواردة في الجدول (٤-١).

٢- حساب شدة الحقل في منطقة الاستقبال .

نعوض قيم الاستطاعة المشعة للترددات الواردة في الجدول (٤-١) في المعادلة (٤-١٠-أ) ونحسب شدة الحقل المنتجة في منطقة الاستقبال.

٣- حساب نسبة مستوى الإشارة إلى مستوى الضجيج.

من شدة الحقل المحسوبة ومستوى الضجيج المعطى في الجدول (٤-١) نحسب مستوى الإشارة إلى مستوى الضجيج للترددات الواردة في الجدول (٤-١).

٤- ندرج القيم المحسوبة في الفقرات السابقة في الجدول (٤-٢).

الجدول ٤-٢: لتحديد تردد التشغيل الأنسب للمعطيات الواردة في المثال (٤-١)

التردد f [KHz]		١٥	٢٠	٣٠	٤٠	٦٠	٨٠
طول الموجة	λ [Km]	٢٠	١٥	١٠	٧,٥	٥	٣,٧٥
مردود الهوائي	η [%]	٧,٩	١٤	٢٦	٤٣	٤٧	٥٠
الاستطاعة المشعة	P [KW]	٣١,٦	٥٦	١٠٤	١٧٢	١٨٨	٢٠٠
شدة الحقل في منطقة الاستقبال	$[\mu V/m]$	٣٨	٣٦	٢٦	٢٠	٨,٤	٣,٦
مستوى الضجيج في منطقة الاستقبال	$[\mu V/m]$	٤٠	٠	٢٥	١٨	١٠	٥
نسبة مستوى الإشارة إلى مستوى الضجيج		٠,٩٥	١,٠	١,١٥	١,١٣	٠,٨٤	٠,٧٢

٥- تحديد تردد التشغيل الأنسب

من الجدول (٤-٢) يتبين أن التردد $f = 20\ KHz$ هو أنسب تردد تشغيل. إلا أنه كما يتبين من الجدول يمكن استعمال أي تردد من $20\ KHz$ حتى $40\ KHz$ كتردد تشغيل مناسب نظراً لأن نسبة الإشارة إلى الضجيج في هذا المجال الترددي لا تتغير كثيراً . وينتج جهاز الإرسال عند عمله على تردد التشغيل الأنسب $f = 20\ KHz$ شدة حقل قدرها $E_{eff} = 36\,\mu V/m$ في منطقة الاستقبال.

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الخامس

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

٥- انتشار الأمواج الطويلة والمتوسطة

٥-١ معالجة عامة لانتشار الأمواج الطويلة والمتوسطة

الأمواج الطويلة LW (Long Wave) وتسمى أيضاً الترددات المنخفضة LF (Low Frequency) هي الأمواج الكهرطيسية المحددة بالمجال الترددي $f=30\text{-}300\ KHz$ ($\lambda=10\text{-}1Km$) ، والأمواج المتوسطة MF (Medium Wave) وتسمى أيضاً الترددات المتوسطة MF (Medium Frequency) هي الأمواج الكهرطيسية المحددة بالمجال الترددي $f=300\ KHz\text{-}3\ MHz$ ($\lambda=1Km\text{-}100\ m$) . وكما هي الحال في الأمواج الطويلة جداً يجب التمييز هنا أيضاً بين الأمواج السماوية والأمواج الأرضية. وبما أنه تمت في الفصل الثاني معالجة انتشار الأمواج الأرضية لكل المجالات الترددية بما فيها الأمواج الطويلة والمتوسطة، لذلك نكتفي في هذا الفصل بمعالجة انتشار الأمواج السماوية بالدرجة الأولى وذلك في المجالين الترددين المشار إليهما أعلاه.

يتم انعكاس الأمواج الطويلة جداً في الطبقة D نهاراً. ولانعكاس الأمواج الطويلة والمتوسطة حاجة إلى كثافة الكترونات أكبر مما هي عليه في الطبقة D . ويمكن تحديد كثافة الالكترونات اللازمة لانعكاس الأمواج الطويلة والمتوسطة بموجب المعادلة (٣-١٥) للشعاع الوارد عمودياً ($\psi = \pi/2$) والمعادلة (٣-١٤) للشعاع الوارد أفقياً ($\psi = 0$) . ويبين الجدول (٥-١) قيم كثافة الالكترونات اللازمة لانعكاس الأمواج الطويلة والمتوسطة.

الجدول ٥-١: كثافة الالكترونات اللازمة لانعكاس الأمواج الطويلة والمتوسطة في الطبقة E ($\upsilon \approx 10^5\ s^{-1}$)

التردد	كثافة الالكترونات $[Electron/cm^3]$	
	للورود العمودي	للورود الأفقي
$100\ KHz$	125	4
$1.5\ MHz$	3.10^4	900

منه يتبين أن الأمواج الطويلة والمتوسطة تخترق الجو المتأين إلى عمق أكبر من العمق الذي تخترقه الأمواج الطويلة جداً، حيث كثافة الالكترونات أكبر. ويزداد هذا العمق بازدياد التردد. وتتعرض الأمواج الطويلة والمتوسطة عند انعكاسها في الطبقة E وتحديداً خلال عبورها الطبقة D لامتصاص شديد نهاراً.

تظهر نتائج المراقبة العملية أن الجو المتأين يمتص الأمواج الطويلة والمتوسطة في النهار امتصاصاً شديداً بشكل لا حاجة معه لإعطاء أي أهمية للأمواج السماوية الناجمة من إشعاع أجهزة الإرسال لقيم الاستطاعات المتعارف عليها في هذا المجال الترددي. كما تظهر نتائج المراقبة العملية أن نسبة شدة حقل الأمواج السماوية في نهار أيام الصيف إلى شدة حقل الأمواج السماوية في ليل أيام الصيف على التردد KHz 245 هي 10^{-3}، وفي الشتاء تكون هذه النسبة 10^{-1} . بعد ابتداء الظلام ينخفض امتصاص الأمواج الطويلة والمتوسطة السماوية كثيراً بحيث يمكن أن تكون شدة حقل الأمواج السماوية أكبر من شدة حقل الأمواج الأرضية في منطقة الاستقبال.

بناء على ما سبق يمكن القول إن أهم خواص انتشار الأمواج الطويلة والمتوسطة هي أنها تنتشر في ساعات النهار كأمواج أرضية فقط، وتنتشر بعد ابتداء الظلام كأمواج سماوية وأمواج أرضية. ويحدد بعد منطقة الاستقبال عن جهاز الإرسال أهمية كل من الموجتين السماوية والأرضية.

٥-٢ خواص انتشار الأمواج الطويلة والمتوسطة

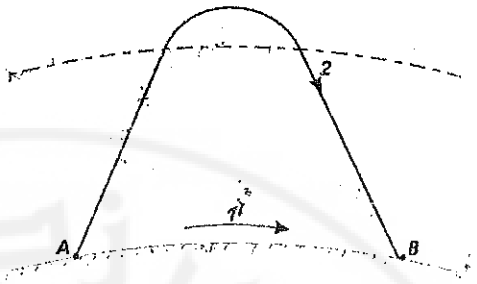
نورد فيما يلي الظواهر التي تمت مراقبتها عملياً عند انتشار الأمواج الطويلة والمتوسطة.

١- تغير شدة الحقل المستقبلة خلال فترات زمنية قصيرة (الخفوت)

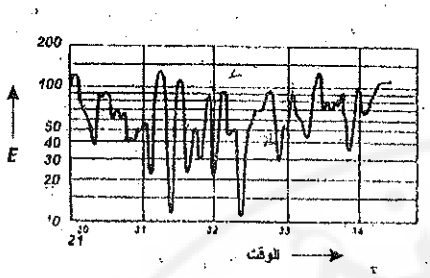
إذا كانت منطقة الاستقبال B (الشكل ٥-١) موجودة ضمن مدى الموجة الأرضية 1 تصل إلى المنطقة B بعد ابتداء الظلام الموجة السماوية 2 أيضاً. وينجم الحقل الكهربائي في المنطقة B نتيجة تراكم الموجة 1 والموجة 2 . وحسب الفرق بين زاويتي طور الشعاعين المتداخلين يمكن أن تكون محصلة الحقل أقوى أو أضعف من الحقلين الافراديين للشعاعين المتداخلين. ولو كان الجو المتأين وسطاً ثابتاً لا تتغير صفاته بمرور الزمن لبقي الفرق بين زاويتي الشعاعين المتداخلين أيضاً ثابتاً بمرور الزمن، ولبقي مطال محصلة الحقل ثابتاً لا يتغير بمرور الزمن.

ولكن كما ورد في المقطع (٣-١٠) يتعرض الجو المتأين بسب تركيبه الغيمي إلى تغير مستمر في كثافة الالكترونات. وينجم عن ذلك تغير مستمر في ارتفاع مستوي الانعكاس وبالتالي تغير طول الطريق الذي تقطعه الموجة السماوية، مما يسبب تغيراً مستمراً في زاوية

طورها ثم تغير اً مستمر اً لمطال محصلة الحقل في منطقة الاستقبال وهذا ما يسمى الخفوت.



الشكل ٥-١: لتوضيح نشوء الخفوت نتيجة تداخل موجة أرضية وموجة سماوية.



الشكل ٥-٢ : خفوت ليلي حيث تم قياس شدة الحقل على الموجة $\lambda=350\ m$.

يبين الشكل (٥-٢) مثالاً مميزاً لظاهرة الخفوت في مجال الأمواج المتوسطة، ويظهر تغير شدة الحقل ليلاً في منطقة الاستقبال التي تم قياسها على الموجة $\lambda=350\ m$.

في مجال الأمواج الطويلة والمتوسطة يمكن أن تتغير شدة حقل الإشارة المستقبلة نتيجة الخفوت أكثر من عشرة أضعاف، وتتغير مدة الخفوت الوسطية من ثانية إلى بضع دقائق.

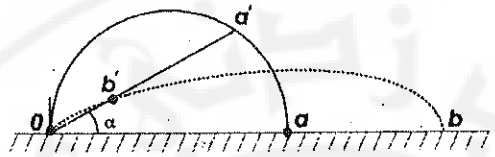
إذا كان جهاز الاستقبال موجوداً خارج المدى الذي تصل إليه الموجة الأرضية يمكن أن تحدث ظواهر الخفوت نتيجة تداخل موجتين سماويتين أو أكثر.

تشوش تأثيرات الخفوت على الاتصالات اللاسلكية بشكل ملموس مما يوجب اتخاذ إجراءات فنية للتقليل من تأثيراته وضمان تحقيق اتصال لاسلكي جيد. ويميز بين إجراءات سلبية (*passive*) وإجراءات ايجابية (*active*) للتقليل سن تأثير الخفوت قدر الإمكان.

من الإجراءات السلبية استخدام جهازي استقبال وهوائيين (أو ثلاثة) موضوعين في مكانين يبعد الواحد عن الآخر مقدار 10λ على الأقل، حيث يتم جمع إشاراتي خرجهما أو اختيار الإشارة الأقوى والأنقى من إشاراتي الخرج. كما يستخدم أيضاً جهاز استقبال مع هوائي ذي مخطط إشعاعي متحرك في المستوي العمودي على سطح الأرض بحيث يمكن اختيار نقطة انعكاس مناسبة في الجو المتأين.

من الإجراءات الإيجابية للتقليل من تأثيرات الخفوت إجراء يطبق بشكل واسع في الإرسال الإذاعي وهو استعمال هوائي مصمم بشكل خاص يسمى " هوائي إرسال مقلل للخفوت " سنتم معالجته فيما يلي.

تستعمل في المحطات الإذاعية التي تعمل في مجال الأمواج المتوسطة غالباً هوائيات عمودية مؤرضة كهوائيات إرسال. المخطط الإشعاعي لمثل هذه الهوائيات هو بالتقريب الأول على شكل نصف دائرة في المستوي الشاقولي عندما يكون للأرض المثبت فوقها الهوائي ناقلية كبيرة (الشكل ٥-٣). وتشع هذه الهوائيات بالإضافة إلى الأمواج التي تنتشر على سطح الأرض قدرة بزوايا ميل عديدة مع الأفق، أي أنها تشكل مصدراً لأمواج سماوية قوية.



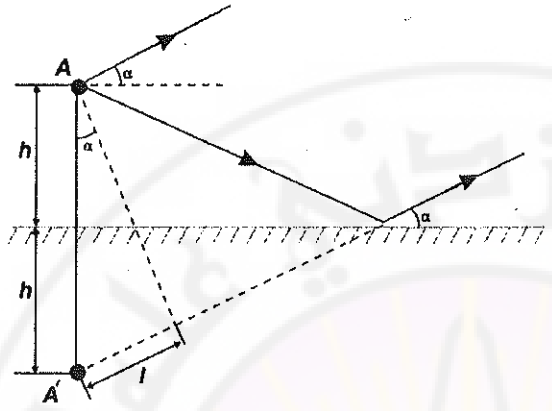
الشكل ٥-٣: المخطط الإشعاعي لهوائي إرسال عمودي عادي (الخط المستمر)
ولهوائي إرسال مقلل للخفوت (الخط المتقطع) في المستوي الشاقولي

بإجراء تعديل معين على تصميم هوائي الإرسال يمكن ضغط مخططه الإشعاعي باتجاه سطح الأرض، ويصبح شكل المخطط الإشعاعي كما هو مبين في الشكل (٥-٣). ويشع مثل هذا الهوائي بشكل رئيسي أمواجاً كهرطيسية باتجاه سطح الأرض. وتكون نسبة شدة حقل الموجة الأرضية المشعة من الهوائي المعدل إلى شدة حقل الموجة الأرضية المشعة من الهوائي غير المعدل كنسبة المسافتين ob/oa . إضافة إلى ذلك تكون نسبة شدة حقل الموجتين السماويتين المشعتين بزاوية ميل α مع الأفق كنسبة المسافتين ob'/oa' . منه يتبين أن الهوائيات التي تمتلك مثل هذا المخطط الإشعاعي المضغوط تنتج أمواجاً أرضية أقوى على حساب الأمواج السماوية.

يعتبر الاستقبال الإذاعي في منطقة ما خالياً من الخفوت إذا كان حقل الموجة الأرضية أكبر بثلاث مرات على الأقل من حقل الموجة السماوية. إذا كان الهوائي العادي يحقق هذه النسبة حتى مسافة r_1 من محطة الإرسال تكون المنطقة المحصورة بدائرة نصف قطرها r_1 ومركزها هوائي الإرسال منطقة خالية من الخفوت. عند استعمال هوائيات ذات مخطط إشعاعي مضغوط باتجاه سطح الأرض يزداد نصف قطر المنطقة الخالية من الخفوت إلى القيمة r_2 . بالنسبة للهوائيات المستعملة في الحياة العملية تكون نسبة نصفي القطر $r_2/r_1=2-3$.

للحصول على مخطط إشعاعي مضغوط باتجاه سطح الأرض يجب استعمال مشع A موجود

على ارتفاع معين من سطح الأرض. وإذا كانت ناقلية الأرض كبيرة بما فيه الكفاية يمكن استبدال تأثير الأرض بخيال المشع بالنسبة لسطح الأرض A' كما هو مبين في الشكل (٥-٤). على امتداد سطح الأرض يتجمع حقل المشع وحقل خياله لاتفاقهما في زاوية الطور.



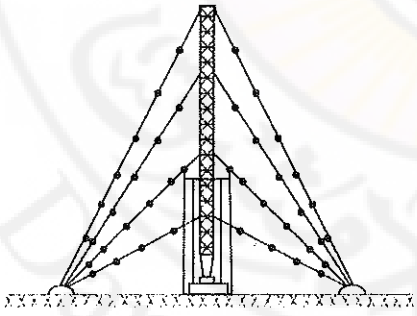
الشكل ٥-٤: تحقيق مخطط إشعاعي مضغوط باتجاه سطح الأرض بتركيب الهوائي على ارتفاع معين من الأرض

أما في الاتجاه الذي يصنع الزاوية α مع سطح الأرض فيحدث فرق في زاوية الطور φ بين الشعاع المباشر والشعاع الناتج من خيال الهوائي نتيجة اختلاف المسافة التي يقطعها كل من الشعاعين بمقدار l ، حيث :

$$l = 2 \cdot h \cdot \sin\alpha \qquad (٥-١)$$

$$\varphi = \beta \cdot l = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot h \cdot \sin\alpha \qquad (٥-٢)$$

ويعمل الفرق في زاوية الطور φ على إضعاف الحقل إذا اختير ارتفاع موضع الهوائي عن سطح الأرض بشكل صحيح بحيث ينتج مخططاً إشعاعياً على الشكل المضغوط باتجاه سطح الأرض كما هو مبين في الشكل (٥-٣). يبين الشكل (٥-٥) طراز هوائي مقلل للخفوت وهو أكثر طرازات الهوائيات المقللة للخفوت تكاملاً، ويمتلك مخطط إشعاعي مضغوط باتجاه سطح الأرض وقد تم تطويره من قبل "*Eisenberg*". يهتز هذا الهوائي ذاتياً بحالة طنين، وهو بطول $h = \lambda/2$. أحيط نصفه الأسفل بحجاب على شكل شبكة أسلاك مؤرضة بحيث يشع نصفه العلوي فقط، وهذا يكافئ هوائي مرفوع عن سطح الأرض.


الشكل ٥-٥: الشكل العملي لهوائي المقلل للخفوت "*Eisenberg*"

٢- تغير شدة الحقل المستقبلة بتغير أوقات اليوم

تتغير شدة الحقل المستقبلة خلال أوقات اليوم في مجال الأمواج الطويلة والمتوسطة تغيراً كبيراً جداً. ويتم في النهار امتصاص الموجة السماوية تقريباً كلياً، وتحدد شدة الحقل المستقبلة من حقل الأمواج الأرضية، ونادراً من حقل الأمواج السماوية أيضاً المضعفة كثيراً في الجو المتأين. بعد ابتداء الظلام ترتفع شدة حقل الأمواج السماوية ارتفاعاً كبيراً بحيث يصبح الحقل المستقبل ناجماً عن تداخل الأمواج السماوية والأمواج الأرضية أو الأمواج السماوية بعضها مع بعض. ونميز هنا بين ثلاث حالات بعلاقة المسافة بين جهاز الإرسال وجهاز الاستقبال.

١- إذا كانت الموجة الأرضية بالقرب من جهاز الإرسال أكبر بكثير من الموجة السماوية في الليل فلا يوجد هناك عملياً تغير في شدة الحقل المستقبلة خلال أوقات اليوم المختلفة.

٢- على مسافات أكبر تحدد الموجة الأرضية وحدها شدة الحقل المستقبلة في النهار. في الليل تصبح الموجة السماوية مساوية للموجة الأرضية أو بل أقوى منها. بذلك يزداد متوسط شدة الحقل بعد ابتداء الظلام ويرافق ذلك حدوث ظواهر خفوت قوية.

٣- على مسافات كبيرة جداً من جهاز الإرسال يكون الاتصال اللاسلكي في النهار غير ممكن قطعياً بسبب ضعف الموجة الأرضية الشديد. بابتداء الظلام تقوم الأمواج السماوية وحدها بتحقيق الاتصال اللاسلكي، وقد تم في الليل قياس شدة حقول استقبال كبيرة ناجمة عن إرسال أجهزة إرسال بعيدة. هنا يختفي الخفوت التداخلي مع الموجة الأرضية، ويمكن أن يحدث خفوت فقط نتيجة تداخل عدة أمواج سماوية تسلك طرقاً مختلفة بين جهاز الإرسال ومنطقة الاستقبال عبر الجو المتأين.

تتعلق المسافات التي تتشكل فيها المناطق الثلاثة هذه بالتردد وبشروط انتشار الأمواج الأرضية. وتبتدئ منطقة الخفوت في مجال الأمواج المتوسطة على مسافة أصغر بكثير من المسافة التي تبتدئ فيها الأمواج الطويلة. وبسبب ظروف الاتصال الليلية الجيدة في هذا المجال الترددي يجب أن تزيد المسافة بين أجهزة الإرسال الإذاعي مثلاً والتي تعمل على نفس التردد عن بضعة آلاف الكيلومترات إذا ما أريد تجنب نشوء مناطق تشويش ليلية.

٣- تغير شدة الحقل بتغير فصول السنة

لا تتأثر كثافة الالكترونات في الطبقة E الليلية التي تنعكس فيها الأمواج الطويلة والمتوسطة كثيراً بتغير فصول السنة، بينما تتأثر كثافة الالكترونات في الطبقة D والطبقة E النهاريتين

كثيراً بتغير فصول السنة حيث تزداد كثافة الالكترونات في أشهر الصيف. لذلك يتغير الامتصاص في النهار كثيراً بتغير فصول السنة بينما لا تكاد تتأثر ظروف الاتصال اللاسلكي الليلية بتغير فصول السنة.

وبما أن مقياس جودة الاتصال اللاسلكي هو نسبة جهد الإشارة إلى جهد الضجيج تسوء ظروف الاتصال اللاسلكي في هذا المجال الترددي في فصول السنة التي تحدث فيها عواصف رعدية.

٤- تأثير الدورة الإحدى عشرة سنوية لنشاط الشمس عل شدة الحقل المستقبلة

لا تتأثر ظروف الانتشار في مجال الأمواج المتوسطة كثيراً بدورة نشاط الشمس الإحدى عشرة سنوية.

٥-٣ طرق حساب شدة حقل الأمواج السماوية في مجال الأمواج الطويلة والمتوسطة

تمت في الفصل الثاني معالجة ظروف انتشار الأمواج الأرضية بما فيها الأمواج الطويلة والمتوسطة بالتفصيل، وكذلك طرق حساب شدة حقل الأمواج الأرضية في منطقة الاستقبال. وستتم في هذا المقطع معالجة حساب شدة حقل الأمواج السماوية خلال ساعات الليل فقط.

افترض في هذه المعالجة أن الضياع الناجم عن التخامد والانعكاس في الجو المتأين ضئيل ويمكن إهماله. كما افترض أن الموجة المنتشرة هي موجة كروية، أي أن شدة الحقل تنخفض بعلاقة $1/r$. ويمكن قبول هاتين الفرضيتين فقط خلال ساعات الليل. وسيتم فيما يلي حساب المركبة العمودية لشدة الحقل الكهربائي E_v .

إذا استبدل الجزء المنحني من مسار الأمواج (الشكل٥-١) بمسار على شكل مثلث كما هو مبين في الشكل(٥-٦) يمكن كتابة ما يلي من المثلث OAC :

$$l = 2 \cdot AC = 2 \cdot \sqrt{(R+h^2) + R^2 - 2 \cdot R \cdot (R+h) \cdot \cos\theta} \quad (٣-٥)$$

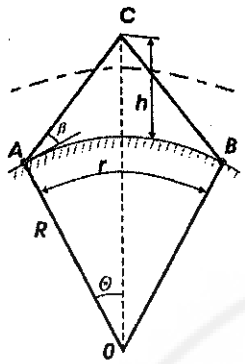
حيث

l طول الطريق الذي تقطعه الأمواج السماوية

R نصف قطر الكرة الأرضية

h ارتفاع نقطة الانعكاس

θ نصف الزاوية المركزية التي تكافئ طول خط الاتصال اللاسلكي r .



الشكل ٥-٦: لتحديد طريق انتشار الأمواج السماوية

باجراء بعض التعديلات البسيطة تصبح المعادلة (٣-٥) كما يلي:

$$l = 2 \cdot \sqrt{4 \cdot R \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}(R+h) + h^2} \qquad (٤-٥)$$

انطلاقاً من الشرطين الموضوعين سابقاً تكون شدة الحقل في النقطة B .

$$E = 2 \cdot \frac{300 \cdot \sqrt{P_{/KW}}}{l_{/Km}} \cdot \varphi(\beta) \quad [mV/m] \qquad (٥-٥)$$

حيث $\varphi(\beta)$ عامل يراعي درجة توجيه هوائي الإرسال. وقد تم ضرب المعادلة بالعامل 2 نتيجة الافتراض بأن سطح الأرض ناقل مثالي وبذلك عاكس مثالي للحقل.

المخطط الإشعاعي في المستوي الشاقولي للهوائيات العمودية التي لا يزيد ارتفاعها على $\lambda/3$ هو بالتقريب الأول على شكل نصف دائرة ، بذلك يمكن استبدال العامل $\varphi(\beta)$ بالقيمة $\cos\beta$. إضافة إلى ذلك ترتبط المركبة العمودية للحقل الكهربائي في النقطة B بالحقل الكلي بالعلاقة:

$$E_v = E \cdot \cos\beta \qquad (٦-٥)$$

بتعويض قيمة E من المعادلة (٥-٥) في المعادلة (٥-٦) ينتج:

$$E_v = \frac{600\sqrt{P_{/KW}}}{l_{/Km}} \cdot \cos^2\beta \quad [mV/m] \qquad (٧-٥)$$

لتحديد قيمة β نكتب المعادلة التالية من المثلث OAC في الشكل (٥-٦).

$$\frac{\sin(\beta + \frac{\pi}{2})}{R+h} = \frac{\sin(\pi - \frac{\pi}{2} - \beta - \theta)}{R} \qquad (٨-٥)$$

بإجراء بعض التحويلات ينتج :

$$\cos^2\beta = \frac{\sin^2\theta}{(1-\frac{h}{R})^2 - 2\cdot(1-\frac{h}{R})\cdot\cos\theta + 1} \qquad (٩-٥)$$

وبما أن الزاوية θ صغيرة جداً يمكن تبسيط المعادلتين (٥-٤) و (٥-٩) تبسيطاً كبيراً جداً، حيث يمكن كتابة العلاقتين التاليتين للزاوية θ الصغيرة.

$$\cos\theta \approx 1-\frac{r^2}{8\cdot R^2} \quad , \quad \sin\theta \approx \theta = \frac{r}{2\cdot R}$$

بتعويض هاتين القيمتين في المعادلتين (٥-٤) و (٥-٩) وإجراء بعض التحويلات مع اعتبار الأرض مستوية ينتج :

$$l \approx 2\cdot\sqrt{\frac{r^2}{4}+h^2} \qquad (١٠-٥)$$

$$\cos^2\beta \approx \frac{(\frac{r}{2})^2}{\frac{r^2}{4}+h^2} \qquad (١١-٥)$$

نعوض هاتين المعادلتين في المعادلة (٥-٧) فينتج :

$$E_v = \frac{300\cdot\sqrt{P_{/KW}}}{(\frac{r^2_{/Km}}{2}+h^2_{/Km})^{3/2}}\cdot\frac{r^2_{/Km}}{4} \quad [mV/m] \qquad (١٢-٥)$$

من المعادلة (٥-١٢) يتبين أنّ هناك حداً أقصى لشدة الحقل بعلاقة المسافة. ومن الشرط $\frac{\partial E_v}{\partial r} \approx 0$ ينتج أنه على مسافة :

$$r = 2\cdot h\cdot\sqrt{2} \qquad (١٣-٥)$$

من جهاز الإرسال يوجد حد أقصى لشدة الحقل. وقد تم إثبات وجود هذا الحد الأقصى بالقياسات العملية.

عند حساب شدة الحقل على مسافات أكبر من ١٠٠٠ كيلومتر يجب مراعاة الأمواج التي تنعكس في الجو المتأين أكثر من مرة وهذا ما يعقد قانون حساب شدة الحقل كثيراً .

عند استعمال هوائي مقلل للخفوت كهوائي إرسال لايمكن تعويض قيمة العامل $\varphi(\beta)$ بالقيمة $\cos\beta$ في المعادلة (٥-٥) نظراً لأن المخطط الإشعاعي لمثل هذا الهوائي يختلف كثيراً عن شكل نصف الدائرة. ويأخذ قانون حساب شدة الحقل في هذه الحالة الشكل التالي.

$$E_v = \frac{150\cdot r\cdot\sqrt{P_{KW}}}{\frac{r^2_{/Km}}{4}+h^2_{/Km}}\cdot\varphi(\beta) \quad [mV/m] \qquad (١٤-٥)$$

تستعمل بشكل عام المنحنيات الصادرة عن المنظمة الدولية *CCIR* لحساب شدة الحقل خلال

ساعات الليل والمبينة في الأشكال (٥-٧) و (٥-٨) و (٥-٩) . تمثل هذه المنحنيات القيم شبه القصوى لشدة الحقل (Quasi maximum) بعلاقة المسافة r ، وقد وضعت بعد مراقبات طويلة وقياسات عملية دامت لسنوات عديدة . وتقرأ من هذه المنحنيات شدة الحقل في منطقة الاستقبال والناجمة عن إرسال استطاعة قدرها ١ كيلو واط ، كما هي الحال بالنسبة للمنحنيات الخاصة بحساب شدة حقل الموجة الأرضية (المقطع ٢-٦) . ويمكن تحديد شدة الحقل في منطقة الاستقبال والناجمة عن إرسال استطاعة ما كما تم في حالة انتشار الأمواج الأرضية بموجب المعادلة :

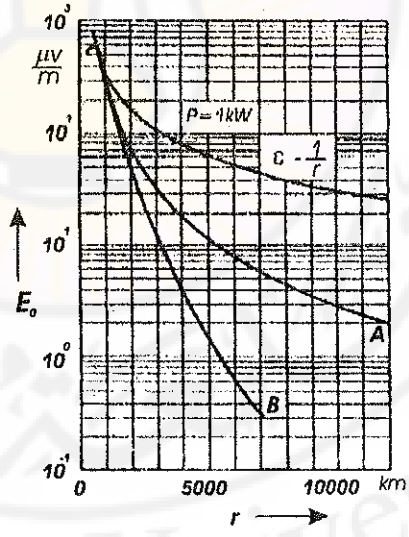
$$E = E_0 \cdot \sqrt{P_{/KW}} \qquad (٥-١٥)$$

حيث E_0 شدة الحقل في منطقة الاستقبال والناجمة عن إشعاع استطاعة ١ كيلو واط.

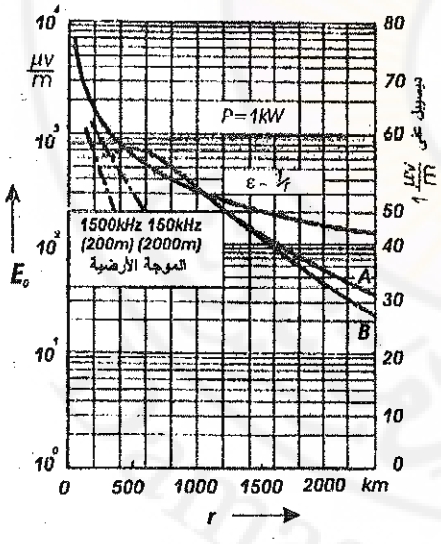
E شدة الحقل في منطقة الاستقبال والناجمة عن إشعاع استطاعة ما قدرها P .

يصلح الشكل (٥-٧) لتحديد شدة الحقل حتى مسافة ١٠٠٠٠ كيلومتر، ويصلح الشكلان (٥-٨) و (٥-٩) لتحديد شدة الحقل حتى مسافة ٢٠٠٠ كيلومتر من جهاز الإرسال.

يمثل المنحني العلوي في الأشكال الثلاثة علاقة شدة الحقل بالمسافة $E \sim 1/r$ عند الانتشار في الفضاء الحر، وذلك للمقارنة مع المنحنيات الأخرى. تصلح المنحنيات A لتحديد شدة

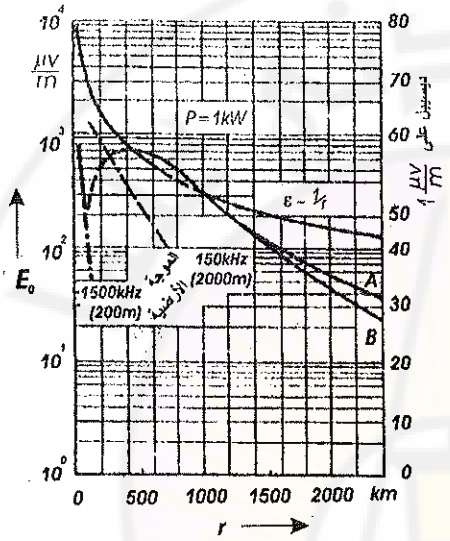


الشكل ٥-٧: القيمة شبه القصوى لشدة الحقل الليلية على مسافات كبيرة، $P=1kW$



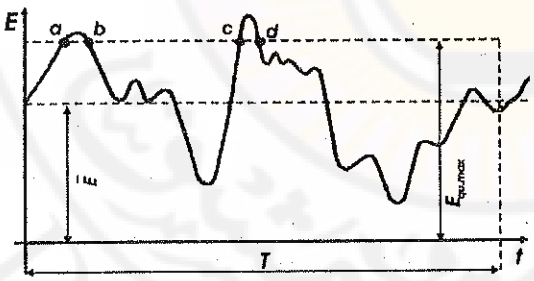
الشكل ٥-٨: القيمة شبه القصوى لشدة الحقل الليلية بعلاقة المسافة عند الانتشار على البحر، $P=1kW$

الحقل الليلية لخطوط الاتصال اللاسلكي البعيدة عن مناطق الضوء القطبي، والمنحنيات B لخطوط الاتصال اللاسلكي التي تمر في مجال القطب المغناطيسي. وبما أن الموجة الأرضية تشارك في تحديد قيمة محصلة شدة الحقل الليلية على مسافات ليست بالكبيرة من جهاز الإرسال وضعت في الشكلين (٥-٨) و (٥-٩) منحنيات منفصلة تمثل انتشار الموجة الأرضية فوق البحر والأرض واليابسة، وهي مرسومة بخطوط متقطعة.



الشكل ٥-٩: القيمة شبه القصوى لشدة الحقل الليلية بعلاقة المسافة عند الانتشار على الأرض اليابسة، $P=1kW$

يبين الشكل (٥-١٠) حالة خفوت شدة الحقل المستقبلة ليلاً، كما يبين القيمة القصوى E والقيمة شبه القصوى $E_{qu.max}$ والقيمة المتوسطة $\overline{E}$ لشدة الحقل. القيمة شبه القصوى هي قيمة شدة الحقل خلال الخفوت التي يتم تجاوزها لفترات زمنية مجموعها 5% فقط من مدة مراقبة الخفوت الكلية. القيمة شبه القصوى في الشكل (٥-١٠) هي القيمة حيث مجموع الفترتين الزمنيتين $(ab)+(cd)$ يساوي T 0.05 . وتكون خلال هاتين الفترتين $E > E_{qu.max}$. تبين نتيجة القياسات العملية أن القيمة المتوسطة تبلغ نحو 0.30 من القيمة شبه القصوى.



الشكل ٥-١٠ : لتعريف القيمة شبه القصوى $E_{qu.max}$ والقيمة المتوسطة $\overline{E}$ لشدة الحقل المستقبلة

مثال ٥-١ :

المطلوب تحديد قيمة المركبة العمودية لشدة الحقل خلال ساعات الليل وعلى بعد $r=1500\ km$ من جهاز الإرسال، الاستطاعة المشعة من الهوائي $12\ kW$ وطول الموجة

$900\ m$. يحدد التابع $\cos\beta$ شكل المخطط الإشعاعي للهوائي. يتم الانتشار فوق البحر.

الحل:

نفترض أن الموجة تنعكس في الطبقة E على ارتفاع $h=120\ km$ من سطح الأرض، بـذلك نحصل بموجب المعادلة (٥-١٢) :

$$E_v = 1.33\,mV/m$$

من المنحنيات البيانية في الشكل (٥-٨) نجد أن شدة الحقل عندما تكون استطاعة الإرسال $1kW$ هي:

$$E_o = 130\,\mu V/m$$

وتكون شدة الحقل عند اشعاع استطاعة قدرها $12\ kW$

$$E = 130\sqrt{12} = 450\,\mu V/m$$

سبب الاختلاف الكبير بين القيمتين العدديتين اللتين تم الحصول عليهما هو إهمال الضياع أثناء الانتشار في المعادلة (٥-١٢) والناجم عن الامتصاص. ويكون التقارب بين القيم المحسوبة بموجب المعادلة (٥-١٢) والقيم المحسوبة بمساعدة المنحنيات في الشكل (٥-٨) أفضل كلما قصر طول خط الاتصال اللاسلكي.

وعلى سبيل المثال تكون شدة الحقل على بعد $400\ km$ من جهاز الارسال ولنفس الاستطاعة المشعة.

بموجب المعادلة (٥-١٢) :

$$E_v = 3.3\,mV/m$$

بموجب المنحنيات البيانية في الشكل (٥-٨):

$$E = 800\sqrt{12} = 2.8\,mV/m$$

الفصل السادس

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

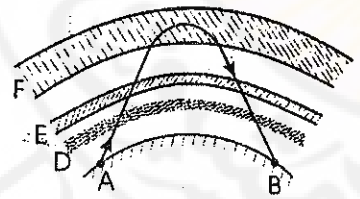
٦- انتشار الأمواج القصيرة

٦-١ معالجة عامة لانتشار الأمواج القصيرة

الأمواج القصيرة SW (Short Wave) وتسمى أيضاً الترددات العالية HF (High Frequency) هي الأمواج الكهرطيسية المحددة بالمجال الترددي f = 3-30 MHz (λ= 100-10 m). وكما هي الحال في الأمواج الطويلة والمتوسطة تنتشر الأمواج القصيرة كأمواج أرضية وأمواج سماوية. ونتيجة الامتصاص الشديد الذي تتعرض له الأمواج القصيرة من سطح الأرض نصف الناقل يؤدي انتشار الأمواج الأرضية في هذا المجال الترددي دوراً حتى مسافة قصوى قدرها Km 100 وذلك عندما تكون استطاعة الإرسال عادية، ويمكن إثبات ذلك بواسطة المعادلة (٢-١٧) . وبما أنه تمت في الفصل الثاني معالجة انتشار الأمواج الأرضية لكل المجالات الترددية بما فيها الأمواج القصيرة، لذلك نكتفي في هذا الفصل بمعالجة الأمواج السماوية.

ونذكر هنا أن الامتصاص من سطح الأرض يزداد بشدة بارتفاع التردد، أي أن امتصاص الأمواج الأرضية في مجال الأمواج القصيرة أشد منه في مجال الأمواج الطويلة والمتوسطة. وبعكس الامتصاص من سطح الأرض الذي يزداد بارتفاع التردد ينخفض امتصاص الأمواج الكهرطيسية في الجو المتأين بارتفاع التردد، مما يعرض الأمواج القصيرة عند انعكاسها في الجو المتأين إلى تخامد ضئيل. لذلك يؤمن انتشار الأمواج القصيرة عن طريق الجو المتأين نتيجة الانعكاس لمرة واحدة أو لمرات متعددة من نقل المعلومات لاسلكياً مهما كانت المسافات بعيدة عن جهاز الإرسال.

في ظروف انتشار الأمواج القصيرة العادية يحدث الانعكاس في الطبقة F_2 ، بينما تمتص الطبقتان E و D الموجودتان تحت الطبقة F_2 الشعاع المار فيهما فقط كما هو موضح في الشكل (٦-١).



الشكل ٦-١: مسار شعاع في ظروف انتشار الأمواج القصيرة الاعتيادية

تبين من نتائج القياسات العملية أن كثافة الالكترونات في الطبقة F_2 أكبر بنحو عشر مرات منها في الطبقة E . منه يتضح مباشرة بأن الجو المتأين العلوي هو وسط الانعكاس الرئيسي للأمواج القصيرة. ويبقى فقط البحث في دور الطبقتين E و D كوسطين ماصين للأمواج

القصيرة نظراً لأن التخامد الناجم عن عبور الجو المتأين السفلي أكبر بكثير من التخامد الناجم عن دخول الطبقة F_2 والانعكاس فيها.

يحدد العامل الأسي التالي الموجود في معادلة حساب شدة حقل الموجة (المعادلة ١-٥٠) امتصاص الأمواج القصيرة خلال عبورها الوسط نصف الناقل، وهو في هذه الحالة طبقات الجو المتأين الدنيا:

$$e^{-\delta L} \qquad (١-٦)$$

حيث δ ثابت الامتصاص و L طول الطريق الذي تقطعه الموجة في الوسط نصف الناقل.

وبما أن الجو المتأين وسط غير متجانس تختلف قيمة الثابت δ من نقطة إلى أخرى في مسار الأمواج. لذلك يحدد الامتصاص الكلي للموجة على طول الطريق الذي تقطعه بالتكامل التالي:

$$e^{-\int \delta dL} \qquad (٢-٦)$$

ويجب إجراء التكامل على طول الطريق الذي تقطعه الأمواج الكهرطيسية في الجو المتأين.

وكما ورد في المقطع (١-٤) تحدد المعادلة التالية (المعادلة ١-٥١) قيمة ثابت الامتصاص:

$$\delta = \frac{\omega}{c} \cdot k \quad [1/m] \qquad (٣-٦)$$

وتحدد المعادلة (١-٥٦) قيمة k حيث :

$$k = \sqrt{\frac{1}{2}\left[-\varepsilon_{r,i} + \sqrt{\varepsilon_{r,i}^2 + (60 \cdot \lambda \cdot \sigma_i)^2}\right]} \qquad (٤-٦)$$

حيث $\varepsilon_{r,i}$ ثابت العازلية الكهربائية النسبي و σ_i الناقلية النوعية للغاز المتأين. وتحدد المعادلتان (٤-١) و (٤-٢) قيمتي $\varepsilon_{r,i}$ و σ_i:

$$\varepsilon_{r,i} = 1 - 3190 \cdot \frac{N}{\omega^2 + \upsilon^2} \qquad (٥-٦)$$

$$\sigma_i = 2.82 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{N \cdot \upsilon}{\omega^2 + \upsilon^2} \quad [1/\Omega m] \qquad (٦-٦)$$

حيث N كثافة حوامل الشحنات، أي عدد الالكترونات الحرة في $1\ m^3$ من الهواء.

υ عدد تصادمات الالكترونات مع الجزئيات الحيادية في $1\ s$.

f تردد الموجة ويعوض بالهرتز.

في مجال الأمواج القصيرة تكون كثافة تيارات الانزياح أكبر بكثير من كثافة تيارات النقل لقيم N وυ في الطبقتين E و F_2 . ويمكن التعبير عن ذلك بالمتراجحة

$60 \cdot \lambda \cdot \sigma_i << \varepsilon_{r,i}$. بتطبيق هذه المتراجحة يمكن تبسيط المعادلة (٦-٤) كما ورد في المقطع (١-٤)، المعادلة (١-٦٢). بتعويض المعادلة (١-٦٢) في المعادلة (٦-٣) وإجراء بعض التحويلات تصبح قيمة ثابت الامتصاص:

$$\delta = 60 \cdot \pi \cdot \frac{\sigma_i}{\sqrt{\varepsilon_{r,i}}} \quad [1/m] \qquad (٦-٧)$$

وبما أن السرعة الزاوية ω في مجال الأمواج القصيرة أكبر بكثير من عدد التصادمات في الثانية υ، يمكن إهمال القيمة υ^2 بالمقارنة مع ω^2 في المعادلة (٦-٥) وتصبح قيمة ثابت العازلية الكهربائية:

$$\varepsilon_{r,i} = 1 - 80.8 \cdot \frac{N}{f^2} \qquad (٦-٨)$$

كما سيتبين لاحقاً تختلف قيمة $\varepsilon_{r,i}$ للأشعة المسطحة قليلاً عن الواحد، وتصبح في قمة مسار الشعاع، أي عند نقطة عودة الموجة، أقل من الواحد بقليل. بذلك يمكن بالتقريب الأول تعويض $\varepsilon_{r,i} \approx 1$ في المعادلة (٦-٧). نعوض المعادلة (٦-٦) في المعادلة (٦-٧) مع مراعاة أن $\omega^2 >> \nu^2$ فينتج:

$$\delta \approx 1.35 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{N \cdot \upsilon}{f^2} \quad [1/m] \qquad (٦-٩)$$

من هذه المعادلة نستنتج ما يلي:

١- بعكس الأوساط نصف الناقلة العادية لا تزداد قيمة ثابت الامتصاص في الجو المتأين بارتفاع تردد الموجة، بل ينقص بارتفاع التردد، ويتناسب عكساً مع مربع الموجة.

٢- تحدد درجة الامتصاص لتردد معين بحاصل جداء كثافة الالكترونات مع عدد التصادمات في الثانية.

تظهر القياسات العملية بأن أقصى كثافة الكترونات خلال ساعات الظهيرة في الطبقة F_2 تبلغ $10^{12} el./m^3$ وفي الطبقة E تبلغ $10^{11} el./m^3$.

ويبلغ عدد التصادمات في الطبقة F_2 $\upsilon \approx 10^3 s^{-1}$ وفي الطبقة E $\upsilon \approx 10^6 s^{-1}$. بذلك يكون حاصل جداء $N \cdot \upsilon$ للطبقة F_2 هو 10^{15} وللطبقة E هو 10^{17}، أي أن ثابت امتصاص الأمواج القصيرة في الطبقة E أكبر بمئة مرة تقريباً من ثابت امتصاص الطبقة F_2. لذلك يمكن اعتبار امتصاص الأمواج الكهرطيسية في الطبقة F_2 قابلاً للإهمال

بالمقارنة مع امتصاص الطبقة E لهذه الأمواج، وهذا ما يثبت الفرضية السابقة حول دور طبقات الجو المتأين الدنيا عند انتشار الأمواج الكهرطيسية القصيرة فيها.

تمتص الطبقة D الأمواج القصيرة بدرجة أكبر من امتصاص الطبقة E، ومعالجة ذلك صعبة ومعقدة. إضافة إلى ذلك يكون عدد التصادمات قريباً من السرعة الزاوية على ارتفاعات الطبقة D ، ولا يمكن إهمال ν بالمقارنة ω في المعادلتين (٦-٥) و (٦-٦) . كذلك لا يتناسب ثابت الامتصاص في الطبقة D عكساً مع مربع التردد. ومع أن علاقة ثابت الامتصاص بالتردد في هذه الطبقة ليست شديدة إلا أنه ينقص بارتفاع التردد.

٦-٢ شرطا تحقيق الاتصال اللاسلكي في مجال الأمواج القصيرة

لتمكن من نقل المعلومات لاسلكياً في مجال الأمواج القصيرة يجب تحقيق شرطين بآن واحد.

الشرط الأول : يجب أن يكون التردد المستعمل لنقل المعلومات لاسلكياً f بواسطة خط اتصال لاسلكي محدد أقل من أقصى تردد يمكن استعماله لهذا الخط MUF (معادلة ٣-٢٣)، حيث يحدد وضع الجو المتأين العلوي أقصى تردد يمكن استعماله لخط الاتصال اللاسلكي.

الشرط الثاني : يجب أن يكون الامتصاص في أسفل الجو المتأين للموجة الكهرطيسية ذات التردد المستخدم في نقل المعلومات لاسلكياً f اعتيادياً. بكلمات أخرى يمكن القول إن شدة الحقل المستقبلة الناجمة عن إشعاع استطاعات اعتيادية لأجهزة الإرسال عن طريق هوائيات إرسال ذات تصميم عادي يجب أن تكون كافية لتأمين استقبال موثوق للإشارات اللاسلكية.

يحدد الشرط الأول الحدود العليا MUF للمجال الترددي الذي يمكن استخدامه، ويحدد الشرط الثاني الحدود الدنيا LUF (*Lowest Usable Frequency*) (أدنى تردد يمكن استعماله) للمجال الترددي الذي يمكن استخدامه حسب درجة التخميد التي تتعرض لها الموجة. والشرط الأول هو حتماً شرط حرج وإذا لم يتحقق فإن الأمواج الكهرطيسية لا تنعكس قطعياً في الطبقة F_2 ولا تصل إلى منطقة الاستقبال مهما كانت استطاعة الإرسال كبيرة. أما الشرط الثاني فهو ليس حرجاً بهذا الشكل إذ يمكن التغلب إلى درجة ما على زيادة التخامد الناجمة عن انخفاض التردد بزيادة استطاعة الإرسال. ويمكن تحقق اتصال لاسلكي على ترددات منخفضة نسبياً في مجال الأمواج القصيرة باستخدام جهاز إرسال قوي بشكل غير اعتيادي.

لتحقيق الشرطين المشار إليهما تم تقسيم مجال الأمواج القصيرة $\lambda = 100\text{-}10\ m$ ($f = 3\text{-}30\ MHz$) عند استعمالها لنقل المعلومات لاسلكياً لمسافات بعيدة عن جهاز الإرسال إلى ثلاثة مجالات جزئية وهي :

١- الأمواج النهارية : وهي الأمواج الواقعة ضمن المجال $\lambda = 25\text{-}10\ m$ ($f = 12 - 30\ MHz$) وتستعمل لتحقيق الاتصالات اللاسلكية خلال ساعات النهار.

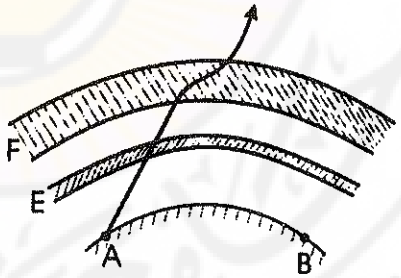
٢- الأمواج الليلية : وهي الأمواج الواقعة ضمن المجال $\lambda = 100\text{-}35\ m$ ($f = 3 - 8.5\ MHz$) وتستعمل لتحقيق الاتصالات اللاسلكية خلال ساعات الليل.

٣- الأمواج البينية : وهي الأمواج الواقعة ضمن المجال $\lambda = 35\text{-}25\ m$ ($f = 8.5 - 12\ MHz$) وتستعمل لتحقيق الاتصالات اللاسلكية خلال فترة الفجر والغسق.

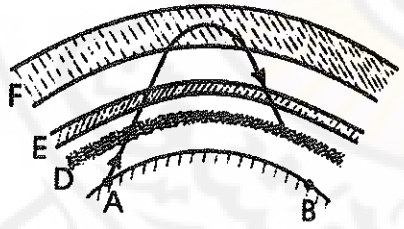
تمكن كثافة الالكترونات العالية في الطبقة F_2 خلال ساعات النهار من الاتصال عبر الأمواج النهارية ذات الترددات العالية نسبياً، إضافة إلى ذلك تمتص الطبقتان D و E ذاتيي التأين الشديد خلال ساعات النهار هذه الأمواج امتصاصاً ضئيلاً بسبب ترددها العالي.

في الليل حيث تنخفض كثافة الالكترونات في الطبقة F_2 يجب تخفيض التردد إلى مجال الأمواج الليلية لتحقيق الشرط الأول، ويكون امتصاص الأمواج الكهرطيسية ذات الترددات الأقل من ترددات الأمواج النهارية ليس شديداً في الليل.

يوضح الشكلان (٦-٢) و (٦-٣) ظروف انتشار الأمواج القصيرة عندما لا يتحقق أحد الشرطين السابقين.



الشكل ٦-٢ : طريق انتشار الأمواج القصيرة عندما يتجاوز تردد التشغيل أقصى تردد يمكن استعماله



الشكل ٦-٣ : انتشار الأمواج القصيرة عندما يكون امتصاص أسفل الجو المتأين شديداً

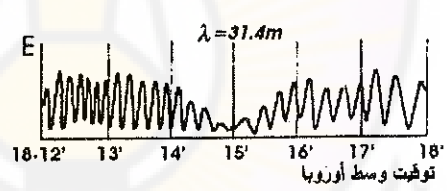
يكافئ الشكل (٦-٢) حالة انتشار الأمواج النهارية في ساعات الليل حيث لا يتحقق الشرط الأول. وإذا استمر العمل على الموجة النهارية بعد ابتداء الظلام تأتي نتيجة الانخفاض

التدريجي لكثافة الالكترونات في الطبقة F_2 اللحظة التي يصبح عندها تردد التشغيل أكبر من أقصى تردد يمكن استعماله ($f > MUF$) ، حيث إن الشعاع لا ينعكس في الطبقة F_2 بل يحني اتجاهه فقط ويعبرها.

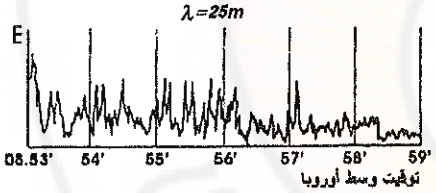
يكافئ الشكل (٦-٣) حالة الأنتشار عند استعمال الأمواج الليلية في النهار، أي عندما لا يتحقق الشرط الثاني. وبما أن تردد هذه الأمواج أقل بكثير من أقصى تردد يمكن استعماله في النهار، يتم عكس هذه الأمواج في الطبقة F_2، إلا أنها تتعرض لتخميد شديد عند عبورها الطبقتين D و E ذات التأين الشديد في النهار، نظراً لأن ثابت الامتصاص يزداد كثيراً بانخفاض التردد (معادلة ٦-٩). ويكون امتصاص الأمواج الليلية خلال ساعات النهار غالباً شديداً حيث لا يمكن معه تحقيق اتصال لاسلكي موثوق.

٦-٣ ظواهر الخفوت في مجال الأمواج القصيرة وأنواع الخفوت

الخفوت : هو تغير شدة الحقل المستقبلة بشكل اعتباطي ونادراً بشكل شبه دوري. ويبين الشكلان (٦-٤) و (٦- ٥) تسجيلين مميزين غالبي الحدوث لشدة الحقل المستقبلة في مجال الأمواج القصيرة.



الشكل ٦-٤ : خفوت شدة الحقل على الموجة $\lambda = 31.4$ m



الشكل ٦-٥ : خفوت شدة الحقل على الموجة $\lambda = 25$ m

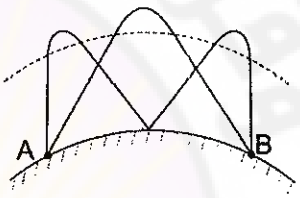
السبب الرئيسي للخفوت في مجال الأمواج القصيرة هو تداخل شعاعين سماويين أو أكثر في نقطة الاستقبال تتغير زوايا طورها باستمرار بمرور الزمن، وذلك نتيجة تغير ارتفاع نقاط انعكاس الأشعة باستمرار وبشكل اعتباطي، مما يسبب تغير شدة محصلة الحقل باستمرار (انظر المقطع ٣-١٠). ولتغير زاوية طور الموجة الواردة بمقدار ١٨٠ درجة يكفي أن يتغير طول الطريق الذي تقطعه بمقدار $\lambda /2$ ، حيث $\lambda /2 = 50 - 5\ m$. وواضح أن مثل هذا

التغير في ارتفاع نقاط الانعكاس يمكن أن يحدث دائماً.

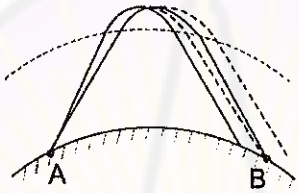
مدة الخفوت الوسطية : هي الفترة الزمنية الوسطية بين قيمتين دنيين أو قصويين لشدة الحقل المستقبلة وذلك لمدة مراقبة طويلة. وتتأرجح مدة الخفوت الوسطية بين أعشار الثانية وعدة ثوان.

عمق الخفوت : هو نسبة القيمة المتوسطة إلى القيمة الدنيا لشدة الحقل وذلك لمدة مراقبة طويلة. وتتغير شدة الإشارة المستقبلة عند الخفوت من $20\ dB$ إلى $40\ dB$.

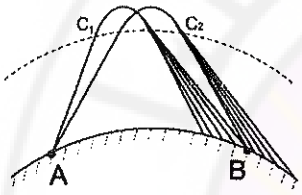
١- الخفوت التداخلي : نعالج أولاً الأسباب الرئيسية المؤدية لنشوء الخفوت التداخلي. وتبين الأشكال (٦-٦) و (٦-٧) و (٦-٨) حالات انتشار أمواج قصيرة حيث تصل إلى منطقة الاستقبال عدة أشعة بآن واحد وتتداخل فيها.



الشكل ٦-٦ : خفوت ناجم عن تداخل شعاع منعكس مرة وآخر منعكس مرتين



الشكل ٦-٧ : خفوت ناجم عن تداخل شعاع نظامي وآخر غير نظامي



الشكل ٦-٨ : خفوت ناجم عن تداخل شعاعين أوليين يخصان حزمتين منثورتين

آ. يحدث أحد أشكال الخفوت التداخلي عندما يصل إلى منطقة الاستقبال شعاعاً منعكساً مرة واحدة وآخر مرتين (أو أكثر) (الشكل ٦-٦)، وتكون محصلة الحقل في منطقة الاستقبال أكبر أو أصغر من شدة حقل الشعاع المنعكس مرة واحدة حسب الفرق بين زاويتي طور الشعاعين.

ب. يكتسب الجو المتأين بتأثير الحقل المغناطيسي للكرة الأرضية صفة الوسط الذي يكسر الأشعة الكهرطيسية بشكل مزدوج. وتسبب هذه الصفة في ظروف انتشار الأمواج القصيرة انشطار الشعاع الوارد إلى الجو المتأين إلى شعاعين، يسمى الأول الشعاع النظامي والثاني الشعاع غير النظامي (الشكل ٦-٧). ومن البديهي أن يصل الشعاعان النظامي وغير النظامي إلى نقطتين مختلفتين على سطح الأرض. كذلك من الواضح أن يصل حينئذ إلى كل نقطة من نقاط سطح الأرض شعاع نظامي وآخر غير نظامي تم انعكاسهما في نقطتين

مختلفتين في الجو المتأين. أما إذا ورد إلى نقطة الاستقبال بالإضافة إلى ذلك شعاع منعكس مرة واحدة وآخر مرتين فيحدث الخفوت حينئذ نتيجة تداخل أربعة أشعة.

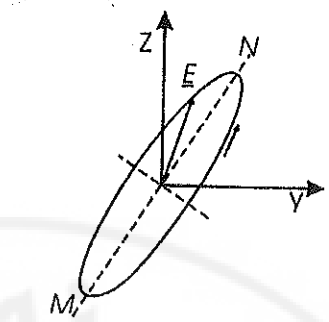
ج. لايمكن اعتبار الجو المتأين أنه سطح خارجي عاكس أملس بشكل مثالي. ويؤدي عدم استواء الجو المتأين إلى أنه بدلاً من انعكاس الأشعة على سطح كالمرآة يحدث جزئياً انعكاس تناثري كما هو موضح في الشكل (٦-٨). منه يتبين أن الشعاع البسيط الوارد إلى الجو المتأين يخرج من الجو المتأين على شكل حزمة أشعة تحوي عدداً كبيراً من الأشعة الأولية المتولدة.

يمكن بمساعدة أنظمة هوائيات خاصة قياس زاوية ميل الأشعة الواردة. وقد ثبت أن زاوية انفراج الحزمة المنثورة تصل حتى خمس درجات. ويصل إلى منطقة الاستقبال عدد كبير من أشعة أولية تخص حزما مختلفة. ويبين الشكل (٦-٨) تداخل شعاعين أوليين أحدهما شعاع أقصى يمين حزمة والآخر شعاع أقصى يسار حزمة أخرى. ولم ترسم حزم الأشعة المنعكسة بين النقطتين C_1 و C_2 حتى لا يصبح الشكل غير واضح بسبب وجود خطوط كثيرة. وتصل الأشعة الأولية المحتواة في هذه الحزم أيضاً إلى النقطة B . ويؤدي تداخل هذه الأشعة أيضاً إلى حدوث الخفوت.

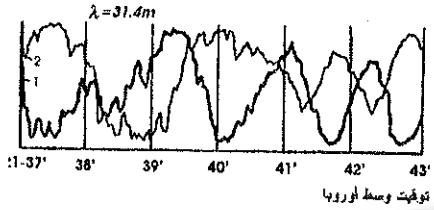
٢- الخفوت الاستقطابي : بالإضافة إلى الخفوت التداخلي يوجد ما يسمى بالخفوت الاستقطابي، وهو أقل حدوثاً من الخفوت التداخلي، ويقدر احتمال حدوثه بنسبة ١٠ % إلى ١٥ % من حوادث الخفوت الكلية.

يتحلل الشعاع المستقطب استقطاباً مستقيماً عند دخوله الجو المتأين بتأثير الحقل المغناطيسي للكرة الأرضية إلى شعاعين يشكلان استقطاب قطع ناقص. ويحدث ذلك عند وجود توزع محدد لكثافة الالكترونات في الجو المتأين، وعندما يتطابق اتجاه الحقل المغناطيسي للأرض مع اتجاه انتشار الأمواج. وتكتسب بذلك محصلة الحقل خاصة حقل مستقطب استقطاب قطع ناقص، وتكون لامركزية القطع كبيرة. ويسبب تغير كثافة الالكترونات في طريق الانتشار تغير مستمر في اتجاه المحور الكبير MN للقطع الناقص (الشكل ٦-٩)، بينما تبقى مقاييس القطع تقريباً ثابتة.

نفترض أن استقبال الإشارات يتم بواسطة هوائي عمودي. في هذه الحالة تكون شدة الحقل المستقبلة أعظمية عندما يكون المحور الكبير للقطع الناقص شاقولي، أي باتجاه الهوائي.



الشكل ٦-٩ : لتوضيح نشوء الخفوت الاستقطابي



الشكل ٦-١٠ : خفوت استقطابي
١- الاستقبال بواسطة ديبول عمودي
٢- الاستقبال بواسطة ديبول أفقي

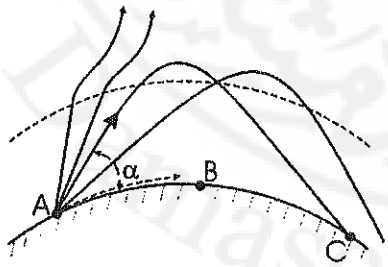
بعكس ذلك عندما يصبح المحور *MN* أفقياً بسبب التغير المستمر في اتجاهه تصبح شدة الحقل المستقبلة أصغرية. بذلك يؤدي تذبذب اتجاه مستوى الاستقطاب إلى ظواهر الخفوت.

أثبت " *Stschukin* " وجود الخاصة الاستقطابية للخفوت بقياس المركبة العمودية والمركبة الأفقية للحقل الكهربائي في منطقة الاستقبال بآن واحد. وحقق ذلك بوضع هوائي ديبول عمودي وآخر أفقي في منطقة الاستقبال ووصلهما بجهازي استقبال منفصلين. ويبين الشكل (٦-١٠) نتيجة إحدى عمليات قياس شدة الحقل المسجلة من جهازي الاستقبال.

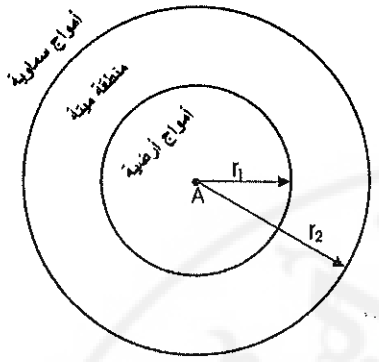
يكافئ المنحني رقم ١ في الشكل (٦-١٠) شدة الإشارة المستقبلة من الهوائي العمودي، والمنحني ٢ شدة الإشارة المستقبلة من الهوائي الأفقي . ويلاحظ أن ارتفاع شدة الإشارة المستقبلة من الهوائي العمودي يرافقه انخفاض شدة الإشارة المستقبلة من الهوائي الأفقي، والعكس صحيح. وهذا يدل على التذبذب المستمر في اتجاه المحور الكبير لقطع الاستقطاب الناقص.

٦-٤ المنطقة الميتة في انتشار الأمواج القصيرة

إحدى خواص انتشار الأمواج القصيرة هي نشوء منطقة ميتة على شكل حلقة مركزها جهاز الإرسال. ويكون استقبال الإشارات ضمن هذه المنطقة مستحيلاً، بينما هو ممكن على مسافات أكبر أو أصغر من المسافات المحصورة ضمن هذه الحلقة. يوضح الشكل (٦-١١) نشوء



الشكل ٦-١١ : لتوضيح نشوء المنطقة الميتة



الشكل ٦-١٢ : المنطقة الميتة عند انتشار الأمواج القصيرة

المنطقة الميتة، ويمثل الخط المتقطع طريق انتشار الموجة الأرضية، وتمثل الخطوط المستمرة مسارات الأمواج السماوية الإفرادية المشعة بزوايا ميل مختلفة.

تمثل النقطة B المسافة التي تنخفض خلالها شدة حقل الموجة الأرضية إلى أدنى قيمة تؤمن استقبال الإشارات بشكل موثوق وذلك لطول موجة محدد. على مسافات أكبر من AB يكون استقبال الموجة الأرضية غير ممكن لأن شدة حقل الموجة الأرضية تنخفض إلى قيم لا تؤمن الاستقبال. الشعاع الذي زاوية ميله α هو آخر شعاع يتم عكسه في الجو المتأين وذلك لطول موجة محدد (الشكل٦-١١). وكل شعاع يرد إلى الجو المتأين بزاوية ميل أكبر من الزاوية α لا يتم عكسه في الجو المتأين بل يعرج مساره قليلاً قبل أن يتابع طريقه في الفضاء الخارجي. ويصل الشعاع الذي زاوية ميله α إلى النقطة C على سطح الأرض، وكلما صغرت زاوية ميل الإشعاع وصل الشعاع بعد انعكاسه في الجو المتأين إلى نقطة أكثر بعداً من جهاز الإرسال. منه يتبين أنه لا تصل إلى المنطقة BC الموجة الأرضية بشكل مؤثر ولا الموجة السماوية قطعياً. وبفرض أن هوائي الإرسال غير موجه في المستوي الأفقي يمكن رسم المنطقة الميتة حول جهاز الإرسال كما هو مبين في الشكل (٦-١٢). تحدد مقاييس المنطقة الميتة بالقطر الداخلي r_1 والقطر الخارجي r_2 .

ويتحدد القطر الداخلي بظروف انتشار الأمواج الأرضية ولا يتعلق طبعاً بأوقات اليوم، ويحدد عن طريق حساب شدة حقل الموجة الأرضية. وبما أن امتصاص الأمواج الأرضية يزداد بارتفاع التردد يصغر القطر الداخلي للمنطقة الميتة بازدياد التردد. يتعلق القطر الخارجي للمنطقة الميتة بأوقات اليوم وكذلك بالتردد. وتنجم علاقة r_2 بأوقات اليوم نتيجة اختلاف كثافة الالكترونات N في الليل عنها في النهار. بموجب المعادلة (٣-١٣) ينقص أقصى تردد يمكن استعماله MUF بين منطقتين بنقصان N . وكما ورد سابقاً إذا كان جهاز الإرسال يعمل على تردد ثابت ونقصت MUF نتيجة نقصان N بحيث تصبح f أكبر من MUF فلا يمكن

تحقيق أي اتصال لاسلكي. لذلك يجب إنقاص قيمة زاوية الميل β في المعادلة (٣-١٣) بحيث يبقى MUF ثابتاً وأكبر من f . ويعني نقصان الزاوية β ازدياد قيمة r_2 . منه يتبين أن القطر الخارجي للمنطقة الميتة يزداد في المساء وفي الليل، وأن أجهزة الإرسال التي تعمل على ترددات عالية في مجال الأمواج القصيرة تمتلك منطقة ميتة ذات قطر خارجي كبير.

٦-٥ تأثير إضطرابات الجو المتأين على الاتصالات اللاسلكية في مجال الأمواج القصيرة

تحدث في الطبقة F_2 المهمة في مجال الأمواج القصيرة، التي تنعكس فيها هذه الأمواج، اضطرابات بدرجة كبيرة. وتظهر هذه الاضطرابات بأحد الأشكال التالية حسب شدتها.

١- انخفاض كثافة الالكترونات في المنطقة المضطربة من الطبقة F_2 .

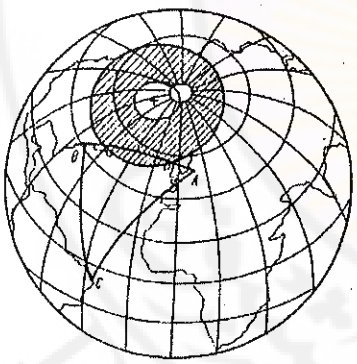
٢- ازدياد الارتفاع الظاهري في المنطقة المضطربة (أنظر الشكل ٦-٢٣).

٣- تدمير تام لمنطقة في الطبقة F_2 يستمر غالباً لبضع ساعات. وتلاحظ هذه الظاهرة فقط عند حدوث اضطرابات شديدة في الجو المتأين.

يؤدي انخفاض كثافة الالكترونات وازدياد الارتفاع الظاهري في الطبقة F_2 بآن واحد إلى انخفاض قيمة MUF مما يوجب تخفيض تردد الاتصال اللاسلكي إلى ترددات أدنى إذا ما أريد تجنب الانقطاع التام للاتصال. كما يسبب اضطراب البنية العادية للطبقة F_2 ضياعات إضافية خلال الانعكاس مما يؤدي إلى إضعاف شدة الحقل المستقبلة.

يؤدي التدمير الكامل للطبقة F_2 إلى الانقطاع التام للاتصالات اللاسلكية بواسطة الأمواج القصيرة.من المعلوم أنه توجد علاقة جغرافية لتأثيرات اضطرابات الجو المتأين، وتكون منطقة قطاع الضوء القطبي الأشد تأثراً بهذه الاضطرابات. وترتبط اضطرابات الجو المتأين بشكل مميز بالدورة الإحدى عشرة سنوية لنشاط الشمس.

تتخذ إجراءات ضد تأثير اضطرابات الجو المتأين على الاتصالات اللاسلكية، وتقسم هذه الإجراءات هنا أيضاً



+ القطب الشمالي المغناطيسي

المنطقة المهشرة هي قطاع الضوء القطبي

الشكل ٦-١٣ : تحويل مسار خط الاتصال بسبب تشوش الجو المتأين

إلى إجراءات سلبية وإجراءات ايجابية.

من الإجراءات السلبية التنبؤ باضطرابات الجو المتأين المتوقعة. وإذا كانت مثل هذه التنبؤات موثوقة فإنها تقدم مساعدة كبيرة لأعمال الاتصال وتمكن من التهيؤ لهذه الاضطرابات بوقف الاتصال اللاسلكي أو بتغيير خط الاتصال اللاسلكي في أوانها.

تشمل الإجراءات الإيجابية ضد تشوش الجو المتأين ما يلي:

١- رفع نسبة شدة حقل الإشارة إلى مستوى الضجيج في منطقة الاستقبال، ويتم ذلك باستخدام أجهزة إرسال ذات استطاعة إرسال أعلى واستخدام أنظمة هوائيات إرسال واستقبال أكثر فعالية.

٢- الانتقال إلى تردد أصغر حسب شدة تأثير تشوش الجو المتأين.

٣- تحويل مسار خط الاتصال اللاسلكي عبر محطات ربط في أوقات التشوش الأشد للجو المتأين وفي الساعات التي تدمر فيها منطقة في الطبقة F_2 العاكسة كلياً. ويبين الشكل (٦-١٣) إحدى حالات التحويل هذه حيث تم استبدال مسار خط الاتصال AB المار في منطقة تشوش شديدة بالمسار AC و CB عبر محطة ربط وتقوية موجودة في النقطة C ، وهذا المسار موجود خارج المنطقة المعرضة لخطر التشوش. ويتم بذلك تجنب أي تأخير في نقل المعلومات بين المحطتين A و B .

٦-٦ تأثير الدورة الإحدى عشرة سنوية لنشاط الشمس على ظروف انتشار الأمواج القصيرة

بعد أن تمت في المقطع (٣-٧) معالجة الصفات الأساسية لتأثيرات هذه الدورة على الجو المتأين العلوي وانتشار الأمواج، نكتفي هنا بإيجاز التأثيرات المهمة في مجال الأمواج القصيرة فقط.

كما ورد سابقاً تزداد كثافة الالكترونات في الطبقة F_2 بازدياد نشاط الشمس وبالتالي زيادة أشعتها فوق البنفسجية. وتوجد علاقة بين التردد الحدي للطبقة F_2 والقيمة الوسطية (السنوية) للعدد النسبي للكلف الشمسية. وعلى سبيل المثال نقص التردد الحدي من الحد الأقصى لنشاط الشمس عام ١٩٤٧ إلى الحد الأدنى عام ١٩٥٤ على الشكل التالي:

في الشتاء ظهراً بمقدار $8\ MHz$

في الصيف ظهراً بمقدار 3 MHz

في الشتاء ليلاً بمقدار 3 MHz

في الصيف ليلاً بمقدار 1 MHz

منه يتبين أن التأثيرات في الاتصال النهاري من أيام الشتاء هي الأكبر. ويجب الانتباه هنا إلى أن اختلاف أقصى تردد يمكن استعماله MUF (المعادلة ٣-١٣) هو أكبر من الاختلافات الواردة أعلاه بكثير . عند الاتصال لمسافات أكبر من 3000 Km يصل تغير MUF في المجال الزمني المشار إليه أعلاه بمقدار 15 MHz نهاراً و 5 MHz ليلاً.

يزداد أيضاً في الحد الأقصى للكلف الشمسية التخامد خلال عبور الأمواج للطبقتين D و E. وترتفع بذلك قيمة أدنى تردد يمكن استعماله، إلا أن هذه الزيادة في التخامد ضئيلة بحيث يكبر المجال الترددي بين MUF و LUF في الحد الأقصى للكلف الشمسية الذي يمكن استخدامه في تحقيق الاتصال عنه في الحد الأدنى للكلف الشمسية. تتحسن في الحد الأقصى للكلف الشمسية بشكل ملحوظ شروط انتشار الأمواج الأقصر في مجال الأمواج القصيرة والمسماة "10 m-$Band$".

٦-٧ طرق حساب شدة الحقل المستقبلة في مجال الأمواج القصيرة

من الصعب جداً تحديد شدة الحقل المستقبلة في مجال الأمواج القصيرة حسابياً بدقة معقولة. بصياغة أدق يجب معرفة طريق انتشار الأمواج القصيرة وضياعاتها أثناء الانعكاس لتحديد شدة الحقل بدقة مقبولة. لذلك يجب تحديد التخامد بموجب العلاقة (معادلة ٦-٢):

$$e^{-\int \delta \cdot dL} \qquad (٦-١٠)$$

حيث δ ثابت الامتصاص الذي تتغير قيمته باستمرار في مسار خط الاتصال اللاسلكي.

dL جزء صغير من المسار.

ويجب إجراء التكامل على مقاطع الطريق الذي يحدث فيها التخامد بتأثير الطبقات المتأينة. كما يجب مراعاة التخامد في حالة الانعكاسات المتعددة بشكل مكافئ. وتعتبر محصلة الحقل في منطقة الاستقبال حاصل جمع شدات حقول الأشعة الإفرادية الواردة إلى المنطقة بشكل تقريبي.

كل طرق حساب شدة الحقل المستعملة في مجال الأمواج القصيرة هي بشكل أو بآخر معادلات تجريبية. وسنعالج فيما يلي طريقتين لحساب شدة الحقل المستقبلة فقط. وقد وضعت

هاتان الطريقتان اعتماداً على المراقبات الطويلة ونتيجة للقياسات العملية العديدة. وثبت عملياً أن هاتين الطريقتين تقدمان أفضل دقة حساب بالمقارنة مع الطرق العديدة الأخرى المطبقة في حساب شدة الحقل.

الطريقة الأولى : وتعتمد على استخدام خرائط امتصاص شهرية تصدر عن جهات معنية بذلك. تحسب شدة الحقل المستقبلة بموجب المعادلة التالية:

$$E = E_0 \sqrt{P_{/KW} \cdot G'} \cdot 10^{-0.5 \cdot A_0 \cdot \bar{q} \cdot d} \quad [\mu V/m] \qquad (٦-١١)$$

حيث P الاستطاعة المشعة من جهاز الإرسال بالكيلوواط.

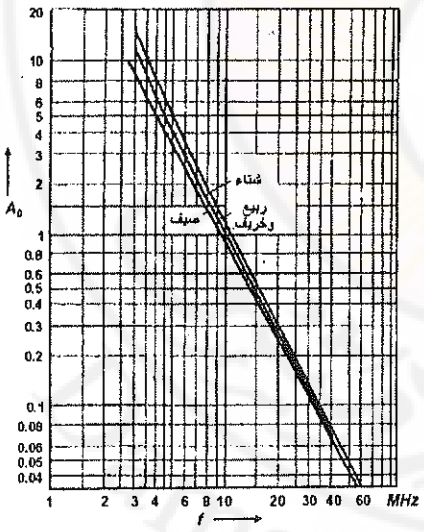
G' عامل توجيه هوائي الإرسال (ربح الهوائي) في المستوي الأفقي بالنسبة للهوائي الديبول بطول نصف الموجة.

E_0 شدة الحقل في نهاية خط الاتصال اللاسلكي في حالة الانتشار في الفضاء الحر (بدون امتصاص) عندما تكون قيمة الاستطاعة المشعة $P = 1\ KW$.

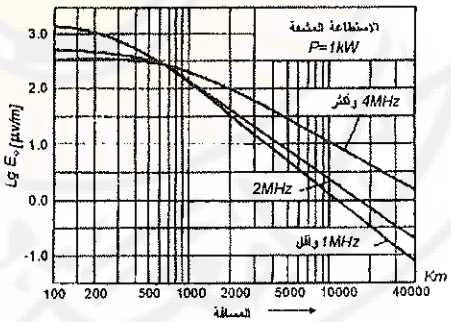
A_0 قيمة الامتصاص عندما تكون الشمس في وضع السمت.

$\bar{q}$ القيمة المتوسطة لدليل الامتصاص الذي يراعي ارتفاع الشمس .

d طول الجزء المضاء من خط الاتصال اللاسلكي بآلاف الكيلومترات.



الشكل ٦-١٥ : علاقة قيمة الامتصاص A_0 بالتردد

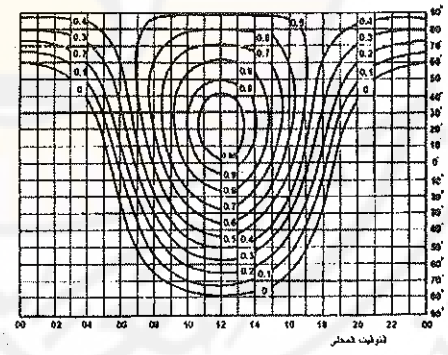


الشكل ٦-١٤ : علاقة شدة الحقل المستقبلة بالمسافة في غياب الامتصاص في الجو المتأين السفلي وللاستطاعة $P = 1KW$

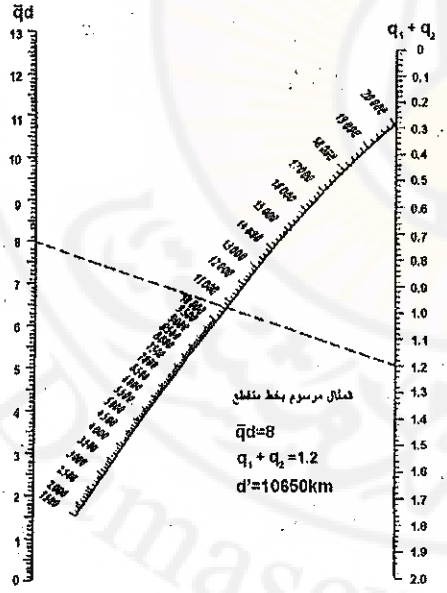
تحدد قيمة E_0 من المنحنيات المبينة في الشكل (٦-١٤) وذلك عندما تكون الاستطاعة المشعة١ كيلو واط، وهي تكافئ بالتقريب الأول شدة الحقل خلال الليل، أي في الساعات التي يكون فيها الامتصاص ضئيلاً.

يراعي الحد $\sqrt{P \cdot G'}$ الزيادة في شدة الحقل الناجمة عن إشعاع استطاعة أكبر من ١كيلوواط وعن عامل توجيه الهوائي. يراعي العامل $10^{-0.5 \cdot A_0 \cdot \bar{q} \cdot d}$ امتصاص الأمواج القصيرة في الطبقتين D و E خلال ساعات النهار.

عند سمت الشمس تكون كثافة الالكترونات في الطبقتين D و E أكبر ما يمكن، وبذلك أيضاً الامتصاص أكبر ما يمكن. وتعني قيمة الامتصاص A_0 مقدار امتصاص تردد محدد في الجو المتأين في هذا الوضع للشمس ولطريق طوله ١٠٠٠كيلومتر. يبين الشكل (٦-١٥) علاقة قيمة الامتصاص A_0 بالتردد ولفصول السنة الأربعة. بازدياد التردد تنقص قيمة الامتصاص A_0 بشدة. تراعي قيمة دليل الامتصاص المتوسطة $\bar{q}$ ارتفاع الشمس على خط الاتصال اللاسلكي، وتكون $q = 1$ عند سمت الشمس و $q = 0$ عندما تنخفض الشمس ١٠ درجات تقريباً تحت الأفق. يبين الشكل (٦-١٦) على سبيل المثال خارطة الامتصاص لشهر تموز. وتتطابق خطوط القيم المتساوية لـ q مع خطوط القيم المتساوية لارتفاع الشمس.



الشكل ٦-١٦ : مثال لخارطة التخامد (شهر تموز)



الشكل ٦-١٧ : نوموغرام لتحديد قيمة الجداء $q.d$

يحوي قانون حساب شدة الحقل (معادلة ٦-١١) القيمة المتوسطة لدليل الامتصاص q وبشكل أدق الجداء $\overline{q} \cdot d$ ، ويتم تحديد هذا الجداء من المجموع $q_1 + q_2$ والمسافة d' بواسطة النوموغرام المبين في الشكل (٦-١٧) . $q_1 + q_2$ هما دليلا الامتصاص في نهايتي خط الاتصال اللاسلكي، أي في نقطتي الإرسال والاستقبال. ويتم تحديدهما لوقت محدد من أوقات النهار بوضع ورقة ترانسبرنت شفافة (بعد رسم مسار خط الاتصال اللاسلكي عليها) على خارطة الامتصاص وقراءة قيمتي q اللتين تخصان موضعي جهازي الإرسال والاستقبال . وإذا كانت إحدى أو كلا نهايتي خط الاتصال موجودة في منطقة يسودها الليل عندها تساوي إحدى أو كلا قيمتي الدليل q الصفر. و d' هي طول الجزء من خط الاتصال اللاسلكي حيث قيمة q لا تساوي الصفر.

لحساب شدة الحقل المستقبلة في ساعات النهار المختلفة يجب تحديد تغير قيمة عامل الامتصاص بتغير أوقات النهار. يتم ذلك بتحديد قيمة الامتصاص عند سمت الشمس A_0 ، وتحديد قيم الجداء $\overline{q} \cdot d$ في ساعات مختلفة من النهار (يتم ذلك غالباً كل ساعتين). بتعويض قيم عامل الامتصاص التي تم الحصول عليها، وقيمة الحد $\sqrt{P \cdot G'}$ في المعادلة (٦-١١) نحصل على قيم شدة الحقل المستقبلة خلال أوقات النهار.

لتسهيل العمل الحسابي من المجدي التعبير عن شدة الحقل بالديسيبل على $1\ \mu V/m$. نأخذ لوغاريتم المعادلة (٦-١١) ونضرب كل حد من حدودها بالعدد ٢٠ فينتج:

$$20\log E = 20\log E_0 + 10\log(P_{/KW} \cdot G') - 10 \cdot A_0 \cdot \overline{q} \cdot d \qquad (١٢-٦)$$

$$E_{/dB} = E_{0/dB} + 10\log(P_{/KW} \cdot G') - 10 \cdot A_0 \cdot \overline{q} \cdot d \qquad (١٣-٦)$$

تمتلك طريقة الحساب هذه سيئة جوهرية إذ يعتبر فيها امتصاص الأمواج القصيرة موزعاً على امتداد خط الاتصال اللاسلكي المنار من الشمس ، وهذا لا يكافئ الواقع نظراً لأن الأمواج الكهرطيسية تمتص فقط في أجزاء محددة من مساراتها ، وبالتحديد عند عبورها الطبقتين D ، E وبشكل ضئيل جداً عند انعكاسها في الطبقة F_2 .

الطريقة الثانية : هذه الطريقة أنسب من الطريقة الأولى نظراً لأنها تعكس الحوادث الفيزيائية الجارية عند انتشار الأمواج الكهرطيسية بشكل كاف، ويحدد بموجبها الامتصاص في كل طبقة متأينة على حدة ومنها يحسب الامتصاص الكلي. وتحسب شدة الحقل بموجب المعادلة التالية:

$$E = E_0\sqrt{P_{/KW}\cdot G'}\cdot e^{-\delta} \qquad (١٤-٦)$$

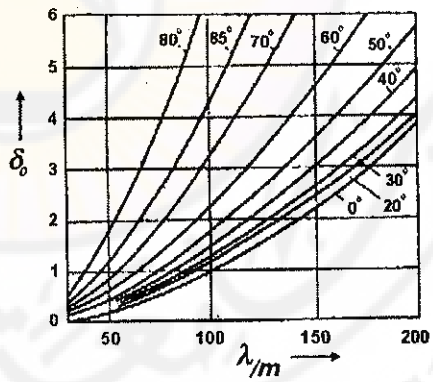
ويكتب ثابت الامتصاص الكلي δ في الحالة العامة على النحو التالي:

$$\delta = \delta_D + \delta_E + \delta_{F_1} + \delta_{F_2} \qquad (١٥-٦)$$

ويشمل الامتصاص في نقاط الانعكاس أيضاً.

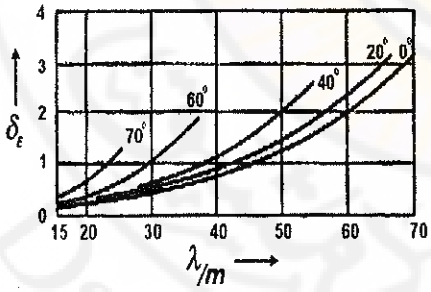
تحدد شدة الحقل E_0 من المنحنيات المبينة في الشكل (٦-١٤). يحدد ثابت الامتصاص في كل نقطة انعكاس من المنحنيات المبينة في الأشكال (٦-١٨) حتى (٦-٢٠) في حالة حدوث تخامد نتيجة عبور الطبقتين D و E (تخامد العبور)، ومن الشكلين (٦-٢١) و (٦-٢٢) في حالة حدوث تخامد نتيجة اختراق الطبقة المتأينة إلى عمق ما والانعكاس فيها (تخامد اختراق). أدرجت في هذه الأشكال أطوال الموجة على محور الإحداثيات الأفقي ، وقيم ثوابت الامتصاص على محور الإحداثيات العمودي. وسيط المنحنيات في هذه الأشكال هو زاوية الورود إلى حدود أسفل الجو المتأين φ_0.

رسم كل منحنٍ من المنحنيات المبينة في الأشكال (٦-١٨) حتى (٦-٢٢) لقيمة تردد حدي معطاة، أي لأقصى كثافة الكترونات في الطبقات المتأينة تكافئ هذا التردد. وتتناسب ثوابت الامتصاص طرداً مع كثافة الالكترونات. وترتبط أقصى قيمة لكثافة الالكترونات بالتردد الحدي بموجب المعادلة (٣-١٥). بذلك يكون:



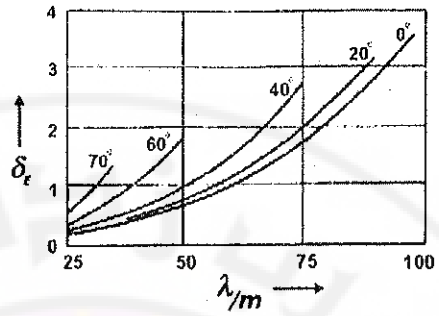
الشكل ٦-١٨ : ثابت امتصاص الطبقة D (تخامد عبور) بعلاقة طول الموجة ولزوايا ورود مختلفة

$N = 10^3 el./cm^3 \qquad \upsilon = 10^7\ 1/s$



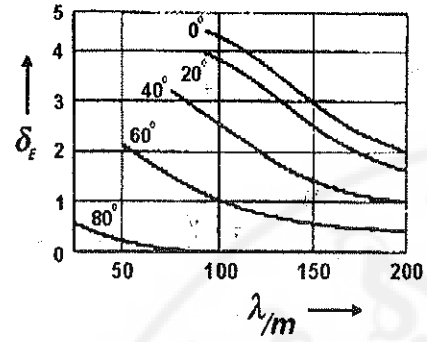
الشكل ٦-١٩ : ثابت امتصاص الطبقة E (تخامد عبور) بعلاقة طول الموجة ولزوايا ورود مختلفة

$f_0 = 4\ 10^6 \quad Hz$



الشكل ٦-٢٠ : ثابت امتصاص الطبقة E ولزوايا ورود مختلفة (تخامد عبور) بعلاقة طول الموجة

$f_0 = 3\ 10^6\ \ Hz$



الشكل ٦-٢١ : ثابت الامتصاص في حالة الانعكاس في الطبقة E (تخامد اختراق) بعلاقة طول الموجة ولزوايا ورود مختلفة

$f_0 = 4\ 10^6\ \ Hz$

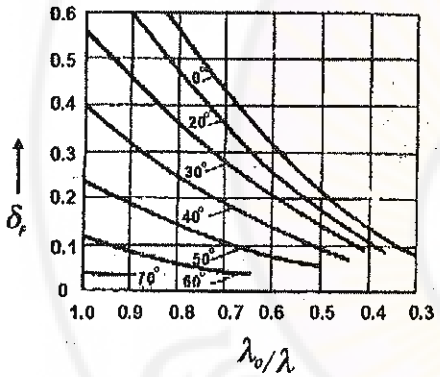
$$N_{\max} = \frac{f_{0/Hz}^2}{80.8} \quad [el./m^3] \qquad (٦-١٦)$$

منه يمكننا تحديد قيم ثوابت الامتصاص δ لقيمة تردد حدي معطاة f_0 بموجب المعادلة:

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{f_0}{f_0^*} \right)^2 \qquad (٦-١٧)$$

وتحدد قيمة ثابت الامتصاص δ_0 للتردد الجدي f_0^* من أشكال المنحنيات.

تحدد زاوية الورود إلى الجو المتأين بالشكل التالي:



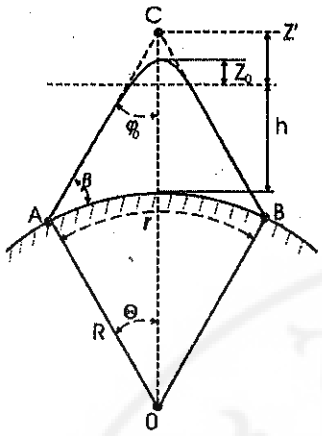
الشكل ٦-٢٢ : ثابت الامتصاص في حالة الانعكاس في الطبقة F_2 (تخامد اختراق) بعلاقة طول الموجة ولزوايا ورود مختلفة

$f_0 = 5.7\ 10^6\ \ Hz$

من المثلث OAC (الشكل ٦-٢٣) نكتب العلاقة التالية:

$$\frac{\sin\varphi_0}{R} = \frac{\sin(180 - \varphi_0 - \theta)}{R + h + Z'} \qquad (٦-١٨)$$

بحل هذه المعادلة بالنسبة للزاوية φ_0 نحصل:



الشكل ٦-٢٣ : لتحديد العلاقة بين زاوية الورود إلى الجو المتأين φ_0 والارتفاع الظاهري لنقطة الانعكاس

$$\tan\varphi_0 = \frac{R\cdot\sin\theta}{h+Z'+R(1-\cos\theta)} \qquad (١٩-٦)$$

بتعويض $R = 6370\ Km$ نحصل على العلاقة التالية بين θ و r.

$$\theta[radian] = \frac{r}{2\cdot R} = \frac{r_{/Km}}{2\cdot 6370}$$

بتحويل قيمة θ إلى درجات يكون:

$$\theta^{\circ} = \frac{360\cdot\theta[radian]}{2\cdot\pi} \qquad (٢٠-٦)$$

٦-٨ تحديد استطاعة جهاز الإرسال

عند معرفة شدة الحقل في منطقة الاستقبال اللازمة لتأمين اتصال لاسلكي موثوق يمكن تحديد استطاعة الإرسال وربح هوائي الإرسال (أي الجداء $\sqrt{P\cdot G'}$) اللازمين من المعادلتين (٦-١١) و (٦-١٤). بحل المعادلة (٦-١١) بالنسبة للجداء PG' بعد تحديد بقية القيم فيها نحصل:

$$P\cdot G' = \left(\frac{E}{E_0}\right)^2\cdot 10\cdot A_0\cdot\overline{q}\cdot d \qquad (٢١-٦)$$

وكما هو معروف تتعلق ظروف الاستقبال بنسبة حقل الإشارة إلى مستوى الضجيج ، وليس بالقيمة المطلقة لحقل الإشارة فقط. عند الاختيار الصحيح لجهاز الاستقبال وهوائي الاستقبال، وبفرض أن جهاز الاستقبال بعيد عن منابع التشويش الصناعي ولا يوجد تأثير لأجهزة إرسال مشوشة، يحدد مستوى الضجيج بالتشويشات الجوية فقط.

مثال ٦-١ :

يعمل خط اتصال لاسلكي على التردد $20\ MHz$. استطاعة الإرسال $5\ KW$ وربح الهوائي 1.5 . المطلوب حساب :

١- نصف القطر الخارجي للمنطقة الميتة لهذا الخط إذا كانت $N_{max} = 4\cdot 10^6\ el./cm^3$

موجودة على ارتفاع $287\ Km$ من سطح الأرض. نصف قطر الكرة الأرضية $6.3710^6 m$.
يعتبر سطح الأرض عند إجراء العمل الحسابي سطحاً مستوياً.

٢- نصف القطر الداخلي للمنطقة الميتة لهذا الخط إذا كانت أدنى شدة حقل لازمة لتحقيق اتصال لاسلكي موثوق هي $200\ \mu V/m$. يمكن استعمال التقريب $W = 1/2X$. القيم الكهربائية للأرض هي $\varepsilon_r = 20$ و $\sigma = 0.6\ 1/\Omega m$

الحل:

١- حساب نصف القطر الخارجي r_2 .

تحدد المعادلة (٣-١٣) أقصى تردد يمكن استعماله لخط اتصال لاسلكي وهو في هذه الحالة $20\ MHz$.

$$f_{max/\,KHz} = \sqrt{\frac{80.8 \cdot N_{max}(1+\frac{2h}{R})}{\sin^2\psi + \frac{2h}{R}}} = \sqrt{\frac{80.8 \cdot 4 \cdot 10^6 (1+\frac{2 \cdot 287}{6370})}{\sin^2\psi + \frac{2 \cdot 287}{6370}}}$$

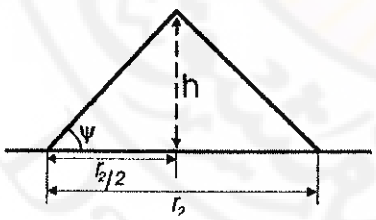
$$20 \cdot 10^3 = \sqrt{\frac{352.28 \cdot 10^6}{\sin^2\psi + 0.09}}$$

بتربيع طرفي المعادلة والحل بالنسبة لـ $\sin^2\psi$ ينتج:

$$\sin^2\psi = \frac{352.28 \cdot 10^6}{400 \cdot 10^6} - 0.09 = 0.79$$

$$\sin\psi = 0.889 \quad \rightarrow \quad \psi = 62.77 \quad \rightarrow \quad \tan\psi = 1.943$$

من الشكل (٦-٢٤) نحدد قيمة r_2 .



الشكل ٦-٢٤ : لتحديد قيمة r_2

$$\tan\psi = \frac{h}{r_2/2}$$

$$r_2 = \frac{2 \cdot 287}{1.943} = 295.4 Km$$

٢- حساب نصف القطر الداخلي r_1 .

تحسب شدة الحقل في منطقة الاستقبال بموجب المعادلة (٢-١٧-آ).

$$E_{eff} = \frac{245\sqrt{P_{1KW} \cdot G}}{r_{1Km}} \cdot W \quad [mV/m]$$

حيث في هذه الحالة $E = 200\ \mu V/m$ و $r = r_1$. ويحسب عامل التخامد بموجب المعادلة $W \approx 1/2X$ وهي تقريب للمعادلة (٢-٢٧) . وتحسب X بموجب المعادلة (٢-٢١).

$$X = \frac{\pi \cdot r_1}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{(\varepsilon_r - 1)^2 + (60 \cdot \lambda \cdot \sigma)^2}}{\varepsilon_r^2 + (60 \cdot \lambda \cdot \sigma)^2}$$

نختبر إمكانية استخدام التقريب بمقارنة قيمة تيار النقل مع قيمة تيار الانزياح،حيثλ=15m.

$$\varepsilon_r = 20 \qquad 60 \cdot \lambda \cdot \sigma = 60 \cdot 15 \cdot 0.6 = 540$$

منه يتبين أن تيار الانزياح أكبر بكثير من تيار النقل، ويمكن استعمال المعادلة (٢-٢٣) لحساب قيمة X .

$$X = \frac{\pi \cdot r_1}{60 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma} = \frac{100 \cdot \pi \cdot r_{1/Km}}{6 \cdot \lambda^2{}_{/m} \cdot \sigma} = \frac{3.14 \cdot r_{1/Km}}{6 \cdot 225 \cdot 0.6} = 0.387 \cdot r_{1/Km}$$

بذلك يكون عامل التخامد .

$$W = \frac{1}{2X} = \frac{1}{2 \cdot 0.387 \cdot r_{1/Km}} = \frac{1}{0.774 \cdot r_{1/Km}}$$

نعوض في المعادلة (٢-١٧-آ) ونحل بالنسبة لـ r_1 بعد تعويض $E_{eff} = 0.2\ mV/m$ فنحصل:

$$E_{eff} = \frac{245\sqrt{5 \cdot 1.5}}{r_{1/Km}} \cdot \frac{1}{0.714 \cdot r_{1/Km}} = \frac{866}{r_{1/Km}^2}$$

$$r_{r/Km}^2 = \frac{866}{0.2} = 4333 \qquad \rightarrow \qquad r_1 = 65.8Km$$

<u>مسألة ٦-٢ :</u>

حدد بالنسبة المئوية درجة تخامد مطال موجة كهرطيسية ترددها $20\ MHz$ تقطع في الطبقة F_2 مسافة قدرها $25\ Km$ إذا كانت $N = 10^{12} el./m^3$ و $\upsilon = 10^3 s^{-1}$.

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل السابع

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

٧- انتشار الأمواج القصيرة جداً والأمواج المكروية

٧-١ تعاريف أساسية

١- الأمواج القصيرة جداً *VSW* (*Very Short Wave*) وتسمى أيضاً الترددات العالية جداً *VHF* (*Very High Frequency*) أو الأمواج المترية *mW* (*metric Wave*) ، هي الأمواج الكهرطيسية المحددة بالمجال الترددي $f = 30 - 300\ MHz$ $(\lambda = 10 - 1\ m)$.

٢- الأمواج المكروية *MW* (*Micro Wave*) هي الأمواج الكهرطيسية المحددة بالمجال الترددي $f = 300\ MHz - 300\ GHz$ ($\lambda = 1m - 1mm$) وتقسم إلى ثلاثة مجالات جزئية هي:

- مجال الأمواج الديسمترية (*Decimeteric Wave*) $\lambda = 1m - 10\ cm$ أو الترددات $f = 300 - 3000\ MHz$ (*Ultra High Frequency*) *UHF*
- مجال الأمواج السنتمترية (*Centrimetric Wave*) $\lambda = 10 - 1\ cm$ أو الترددات $f = 3 - 30\ GHz$ (*Super High Frequency*) *SHF*
- مجال الأمواج المليمترية (*milimetric Wave*) $\lambda = 1cm - 1mm$ أو الترددات $f = 30 - 300\ GHz$ (*Extreme High Frequency*) *EHF*

ولم يتم التمييز السابق بين أمواج قصيرة جداً وأمواج ميكروية بسبب اختلاف ظروف انتشارها، إذ أن ظروف انتشارها لا يختلف بعضها عن بعض إلا قليلاً، ولكنه تم بسبب اختلاف أساليب توليدها وتكبيرها واختلاف طرق إشعاع قدراتها وكذلك طرق تحميلها بالمعلومات. ويختلف أسلوب توليد الأمواج الميكروية وتحميلها بالمعلومات اختلافاً جذرياً عنه في مجال الأمواج المترية.

درجت العادة على استعمال التردد في مجال الأمواج الطويلة والمتوسطة والقصيرة وكذلك الأمواج القصيرة جداً بينما يفضل استعمال طول الموجة في مجال الأمواج الميكروية نظراً لأن المقاييس الهندسية لعناصر داراتها كالهزازات والمكبرات ووحدات إشعاع القدرة ترتبط بعلاقات بسيطة مع طول الموجة.

٧-٢ تأثير الجو المتأين على انتشار الأمواج القصيرة جداً والأمواج الميكروية

خلافاً لمجالات الأمواج الطويلة والمتوسطة والقصيرة التي تمت معالجتها تستطيع الأمواج القصيرة جداً والأمواج الميكروية عادة الانتشار فقط كأمواج حرة أو أمواج مباشرة. يشذ عن هذه القاعدة مجال موجي صغير يقع بعد $\lambda = 10\ m$ ($f = 30\ MHz$) حيث يمكن أن تنتشر

الأمواج القصيرة جداً كأمواج سماوية.

على ما ورد سابقاً يتم انعكاس الأمواج الكهرطيسية في الجو المتأين فقط إذا كان التردد المستعمل للاتصالات اللاسلكي لا يتجاوز أقصى تردد يمكن استعماله لخط الاتصال اللاسلكي. بالتقريب الأول يمكننا اعتبار أن أقصى تردد تشغيل ينعكس في الجو المتأين هو $30\ MHz$ ، وذلك خلال دورة نشاط الشمس الإحدى عشرة سنوية ولخطوط الاتصال اللاسلكي الطويلة جداً وفي النهار. هذا التردد هو الحدود الدنيا لمجال الأمواج القصيرة جداً. إلا أنه تم انعكاس ترددات أعلى من $30\ MHz$ في الطبقة F_2 وذلك في السنوات التي كان فيها نشاط الشمس عالياً. وعلى سبيل المثال أمكن تحقيق اتصال لاسلكي منتظم على التردد $40\ MHz$ $(\lambda = 7.5m)$ في عام١٩٤٧ حيث بلغ العدد النسبي للكلف الشمسية قيمة قصوى غير اعتيادية(R=151.6) وذلك خلال ساعات النهار في أشهر الشتاء. ويجب ملاحظة أن هذه الأمواج تنعكس في الجو المتأين فقط عند ورودها إليه بزوايا ميل صغيرة جداً، وتمتلك بذلك منطقة ميتة كبيرة جداً. ويصل القطر الخارجي للمنطقة الميتة في هذه الحالات حتى $r_2 = 3500\ Km$.

٧-٣ الحالات المختلفة لانتشار الأمواج القصيرة جداً والأمواج الميكروية

إحدى الخواص المميزة لخطوط الاتصال اللاسلكي في مجالي الأمواج القصيرة جداً والأمواج الميكروية هي استعمال هوائيات عالية، وهي هوائيات موجودة على ارتفاع معين من سطح الأرض تغذى بناقل تغذية لا يشع. بذلك يمكن منح هوائي الإرسال صفات المشع النقطي، ويمكن أيضاً الاكتفاء بتحديد شدة الحقل في نقطة وهي موضع وجود هوائي الاستقبال. بهذه الخاصة تختلف هوائيات خطوط الاتصال اللاسلكي في مجالي الأمواج القصيرة جداً والميكروية عن هوائيات المجالات الترددية الأخرى اختلافاً جوهرياً. وبينما تعمل جميع أجزاء الهوائي العمودي على توليد الاهتزازات الكهرطيسية في المجالات الترددية الأخرى يتم إشعاع الأمواج القصيرة جداً والميكروية من موضع وجود المشع، أي من نقطة موجودة على ارتفاع h من سطح الأرض.

يمكن استخدام الهوائيات العالية في أغلب الحالات من تحديد شدة الحقل المستقبلة بموجب ما يسمى " معادلات الانعكاس " التي تراعي التأثير المشترك للشعاع المباشر والشعاع المنعكس على سطح الأرض.

يحتم ضعف ظاهرة الانحناء في مجالي الأمواج القصيرة جداً والميكروية زيادة ارتفاع الهوائيات، إذ تنخفض شدة الحقل بسرعة عند تخطي مدى خط النظر بين هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال. وتزداد سرعة انخفاض شدة الحقل كثيراً كلما قصر طول الموجة في المجالين المذكورين.

من المجدي تقسيم الحالات العملية لانتشار الأمواج القصيرة جداً والميكروية كما يلي:

١- حالة الانتشار إلى مسافات قصيرة حيث يمكن اعتبار سطح الأرض سطحاً مستوياً. في هذه الحالة :

آ - يحسب الحقل بموجب معادلات الانعكاس.

ب- يحسب الحقل بموجب معادلات أدق.

٢- حالة الانتشار إلى مسافات أكبر ولكن لا تتجاوز مدى خط النظر. ويجب عندها مراعاة انحناء سطح الأرض وظواهر الانكسار الجوي. في هذه الحالة :

آ- يحسب الحقل بموجب معادلات الانعكاس بعد مراعاة الشكل الكروي للأرض في هذه المعادلات.

ب- يحسب الحقل بموجب معادلات الانعكاس بعد مراعاة الانكسار الجوي في هذه المعادلات.

ج- يحسب الحقل بطرق أدق تراعي الشكل الكروي للأرض.

٣- حالة الانتشار إلى مسافات تتجاوز مدى خط النظر.

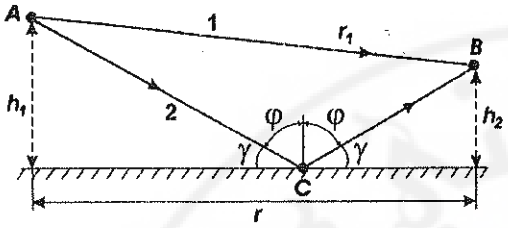
تحسب شدة الحقل بموجب معادلات الانحناء مع مراعاة الانكسار الجوي العادي.

٧-٤ انتشار الأمواج القصيرة جداً والميكروية إلى مسافات قصيرة حيث يمكن إعتبار سطح الأرض مستوياً

١- هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال مرتفعان عن سطح الأرض

نفترض بأن الحقل الكهربائي في منطقة الاستقبال هو حاصل تداخل الشعاع المباشر 1 والشعاع المنعكس على سطح الأرض 2 (الشكل ٧-١). بمعرفة طول خط الاتصال اللاسلكي r وارتفاع كل من هوائي الإرسال h_1 وهوائي الاستقبال h_2 يصبح من السهل تحديد موقع النقطة C وبذلك قيمة زاوية الورود φ وبالتالي زاوية الميل γ . كذلك يمكن تحديد الفرق بين طول طريق الشعاع المباشر وطول طريق الشعاع المنعكس على سطح

الأرض Δr . بمعرفة القيم الكهربائية للأرض التي تنعكس عليها الأمواج ε_r و σ يمكن تحديد عامل الانعكاس R والانزياح في زاوية الطور خلال الانعكاس θ حسابياً أو بيانياً من المنحنيات الموضوعة للاستقطاب العمودي والاستقطاب الأفقي.



الشكل ٧-١ : شعاع مباشر 1 وشعاع منعكس 2 بين هوائيين مرتفعين عن سطح أرض مستوية

بمعرفة الاستطاعة المشعة P بالكيلوواط وعامل توجيه هوائي الإرسال بالنسبة للهوائي النظري النقطي G والمسافة بين هوائي الارسال وهوائي الاستقبال r نحسب شدة الحقل الناجمة عن الشعاع المباشر بموجب المعادلة التالية (انظر المقطع ١-٢) :

$$E_1 = \frac{245\sqrt{P_{/kw}G_1}}{r_{1/km}}\cos\omega t \quad [mV/m] \qquad (١-٧)$$

وشدة الحقل الناجمة عن الشعاع المنعكس على سطح الأرض بموجب المعادلة :

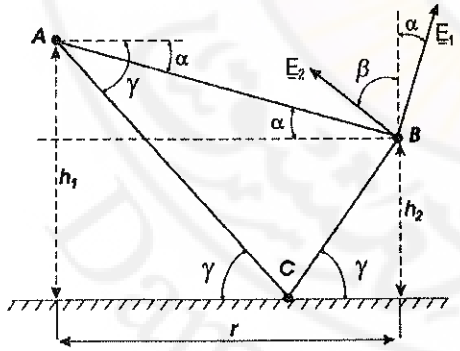
$$E_1 = \frac{245\sqrt{P_{/kw}G_1}}{r_{1/km}} R\cos(\omega t - \Theta - \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r) \quad [mV/m] \qquad (٢-٧)$$

حيث G_1 درجة توجيه هوائي الإرسال بالنسبة للشعاع المباشر

G_2 درجة توجيه هوائي الإرسال بالنسبة للشعاع المنعكس على سطح الأرض

وتحدد القيمتان العدديتان لـ G_2, G_1 من المخطط الإشعاعي لهوائي الإرسال في المستوي العمودي .

تحدد محصلة الحقل الكهربائي في النقطة B بجمع المعادلتين (٧-١) و(٧-٢). ونميز حالتين حسب نوع الاستقطاب.



الشكل (٧-٢) :لتحديد محصلة الحقل المستقبلة في حالة الاستقطاب العمودي

في حالة الاستقطاب الأفقي للأمواج الكهرطيسية المشعة يكون اتجاه الشعاعين $\underline{E}_2, \underline{E}_1$ في النقطة B عمودياً على مستوي الرسم ، وتكون محصلة الحقل الكهربائي في

منطقة الاستقبال مساوية للمجموع الجبري لـ $\underline{E}_1, \underline{E}_2$.

في حالة الاستقطاب العمودي يقع كلا الشعاعين $\underline{E}_1, \underline{E}_2$ في مستوي الرسم إلا أن اتجاهيهما لا ينطبقان. كما يتبين من الشكل (٧-٢) يشكل الشعاع $\underline{E}_1$ الزاوية α والشعاع $\underline{E}_2$ الزاوية β مع الشاقول ، حيث :

$$\alpha = arc.\tan\frac{h_1 - h_2}{r} \quad , \quad \beta = \gamma$$

بذلك يكون استقطاب محصلة الحقل الكهربائي قطعاً ناقصاً ، وتحدد مركبة المحصلة العمودية بموجب المعادلة :

$$E_V = E_1\cos\alpha + E_2\cos\gamma \qquad (٣-٧)$$

آ- استقطاب الأمواج أفقي: في حالة الاستقطاب الأفقي للأمواج الكهرطيسية تحدد محصلة الحقل في منطقة الاستقبال كما يلي :

$$E = 245\sqrt{P_{/KW}}\left[\frac{\sqrt{G_1}}{r_{1/Km}}\cos\omega t + \frac{R\sqrt{G_2}}{r_1+\Delta r}\cos(\omega t - \theta - \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r)\right]$$

$$E = \frac{245\sqrt{P_{/KW}G_1}}{r_{1/Km}}\left\{\cos\omega t\left[1 + \frac{R\sqrt{G_2}r_1}{\sqrt{G_1}(r_1+\Delta r)}\cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r\right]\right. \qquad (٤-٧)$$

$$\left. + \sin\omega t\frac{R\sqrt{G_2}r_1}{\sqrt{G_1}(r_1+\Delta r)}\sin(\theta + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r)\right\} \qquad [mV/m]$$

بتعويض :

$$1 + R\frac{r_1}{r_1+\Delta r}\sqrt{\frac{G_2}{G_1}}\cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r) = A\cos\psi$$

$$R\frac{r_1}{r_1+\Delta r}\sqrt{\frac{G_2}{G_1}}\sin(\theta + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r) = A\sin\psi \qquad (٥-٧)$$

يمكن كتابة المعادلة (٧-٤) بالشكل التالي :

$$E = \frac{245\sqrt{P_{/KW}G_1}}{r_{1/Km}}A\cos(\omega t - \psi) \quad [mV/m] \qquad (٦-٧)$$

وتحدد قيمتا الثابتين A و ψ من المعادلتين (٧-٥) ، حيث :

$$A = \sqrt{1 + R^2(\frac{r_1}{r_1+\Delta r})^2\frac{G_2}{G_1} + 2R\frac{r_1}{r_1+\Delta r}\sqrt{\frac{G_2}{G_1}}\cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r)} \qquad (٧-٧)$$

$$\psi = arc \cdot \tan \frac{R(\frac{r_1}{r_1+\Delta r})\sqrt{\frac{G_2}{G_1}}\sin(\theta+\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r)}{1+R(\frac{r_1}{r_1+\Delta r})\sqrt{\frac{G_2}{G_1}}\cos(\theta+\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r)} \qquad (٨-٧)$$

وبما أن القيمة المؤثرة في الاستقبال هي القيمة الفعالة لشدة الحقل التي لا تتعلق بزاوية الطور ψ وبالتردد ω ($E_{eff} = \frac{\hat{E}}{\sqrt{2}}$) ، نهمل المعادلة (٧-٨). وتصبح معادلة حساب القيمة الفعالة على الشكل التالي :

$$E_{eff} = \frac{173\sqrt{P_{/KW}G_1}}{r_{1/Km}}A \quad [mV/m] \qquad (٩-٧)$$

وتحدد A بموجب المعادلة (٧-٧).

ب- استقطاب الأمواج عمودي: في حالة الاستقطاب العمودي للأمواج الكهرطيسية تحدد المركبة العمودية لمحصلة الحقل في منطقة الاستقبال كما تم في حالة الاستقطاب الأفقي بعد مراعاة المعادلة (٧-٣).

$$E = \frac{245\sqrt{P_{/KW}G_1}}{r_{1/Km}}[\cos\alpha\cos\omega t + \cos\gamma\, R\frac{r_1}{r_1+\Delta r}\sqrt{\frac{G_2}{G_1}}\cos(\omega t-\theta-\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r)] \qquad (١٠-٧)$$

بإعادة إجراء التحويلات التي تمت من المعادلة (٧-٤) حتى (٧-٩) ينتج :

$$E_{eff} = \frac{173\sqrt{P_{/KW}G_1}}{r_{1/Km}}A \quad [mV/m] \qquad (١١-٧)$$

$$A = \left(\cos^2\alpha + \cos^2\gamma\cdot R^2(\frac{r_1}{r_1+\Delta r})\ \frac{G_2}{G_1} + 2\cos\alpha\cos\gamma\, R(\frac{r_1}{r_1+\Delta r})\sqrt{\frac{G_2}{G_1}}\cos(\theta+\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r)\right)^{1/2}$$

للتطبيق العملي للمعادلتين (٧-٩) و (٧-١١) يجب معرفة زاوية الميل γ ، المسافتين r_1 و r_2 ، الزاوية α ، عامل انعكاس سطح الأرض R ، الانزياح في زاوية الطور خلال

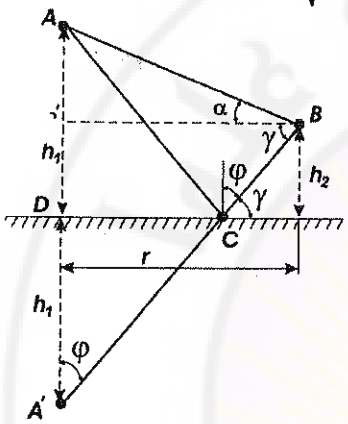
الانعكاس على الأرض θ .

نرسم في الشكل (٧-٢) خيال النقطة A بالنسبة لسطح الأرض 'A ونمدد الخط BC حتى 'A فنحصل على الشكل (٧-٣). من المثلث $BB'A$ يمكن كتابة :

$$\tan\gamma = \frac{h_1 + h_2}{r} \qquad (١٢-٧)$$

$$r_1 = AB = \sqrt{r^2 + (h_1 - h_2)^2} \qquad (١٣-٧)$$

$$r_2 = A'B = \sqrt{r^2 + (h_1 + h_2)^2} \qquad (١٤-٧)$$



الشكل ٧-٣ : لتحديد الزاويتين α و γ

ومن المثلث $BB'A$ يمكن كتابة :

$$\tan\alpha = \frac{h_1 - h_2}{r} \qquad (١٥-٧)$$

يجب حساب حاصل الطرح $\Delta r = r_2 - r_1$ بدقة تعادل عُشْر طول الموجة، ولا يقدم الطرح المباشر مثل هذه الدقة. لذلك ننشر المعادلتين (٧-١٣) و (٧-١٤) مع مراعاة أن $r >> (h_1 + h_2)$، ثم نطرح السلسلتين من بعضهما.

$$r_1 = r\left[1 + \left(\frac{h_1 - h_2}{r}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = r + \frac{r}{2r^2}(h_1 - h_2)^2 - \frac{r}{8r^4}(h_1 - h_2)^4 + \cdots \qquad (أ-١٣-٧)$$

$$r_2 = r\left[1 + \left(\frac{h_1 + h_2}{r}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = r + \frac{r}{2r^2}(h_1 + h_2)^2 - \frac{r}{8r^4}(h_1 + h_2)^4 + \cdots \qquad (أ-١٤-٧)$$

ويكون حاصل الطرح :

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \frac{2h_1h_2}{r} - \frac{h_1h_2}{r^3}(h_1^2 + h_2^2) + \cdots \qquad (١٦-٧)$$

يحدد عامل الانعكاس R والانزياح في زاوية الطور أثناء الانعكاس θ من المنحنيات البيانية المرسومة في الأشكال (١-٢٤) حتى (١-٢٩) . رسمت هذه المنحنيات لمجال الأمواج القصيرة جداً والميكروية مرة أخرى في الأشكال (٧-٤) حتى (٧-٩). تخص المنحنيات المرسومة في الشكلين (٧-٤) و (٧-٥) الأرض الجافة، وفي الشكلين (٧-٦) و (٧-٧)

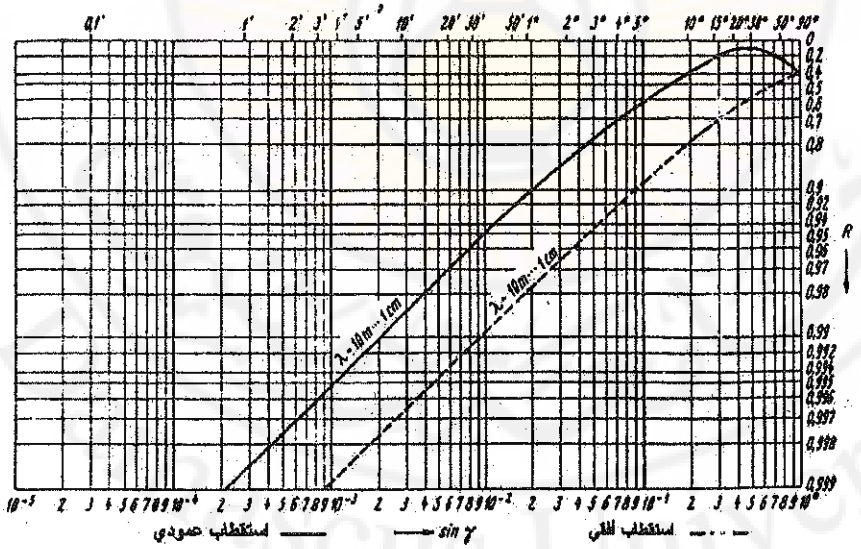
الأرض الرطبة، وفي الشكلين (٧-٨) و (٧-٩) مياه البحر. أدرجت في هذه الأشكال على محور الإحداثيات الأفقي قيم $\sin\gamma$ وعلى المحور العمودي قيم R أو θ. تخص المنحنيات المرسومة بخطوط مستمرة الأمواج الكهرطيسية المستقطبة عمودياً والمرسوم بخطوط متقطعة الأمواج المستقطبة أفقياً. أدرج على المنحنيات طول الموجة بالمتر أو بالسنتيمتر.

تحدد قيمتا درجة توجيه الهوائي G_1 و G_2 الموجودتان في المعادلات السابقة من المخطط الإشعاعي لهوائي الإرسال في المستوي الشاقولي، وذلك بعد معرفة الزاوية بين الشعاع المباشر والشعاع المنعكس على الأرض عند هوائي الإرسال. ويمكن تحديد هذه الزاوية من الشكل (٧-٢)، حيث $\chi = \gamma - \alpha$.

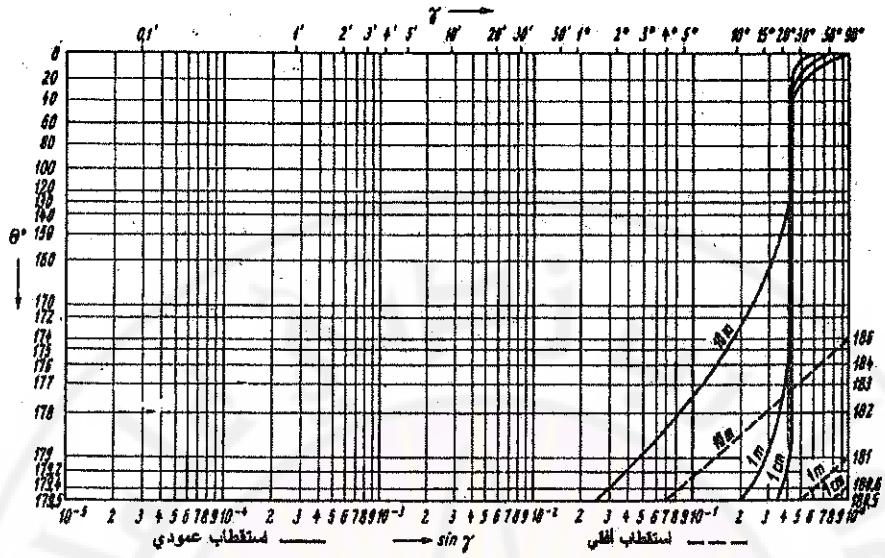
تمكن المعادلات المشتقة فيما سبق من تحديد محصلة الحقل في منطقة الاستقبال، أي الحقل الكهربائي الأفقي في حالة استقطاب الإشعاع أفقياً والمركبة العمودية للحقل الكهربائي في حالة استقطاب الإشعاع عمودياً.

من الشكل (٧-٢) يتبين أنه في حالة استقطاب الإشعاع عمودياً تنشأ أيضاً مركبة أفقية لحقل الأمواج الكهربائي تحدد قيمتها المطلقة بموجب المعادلة:

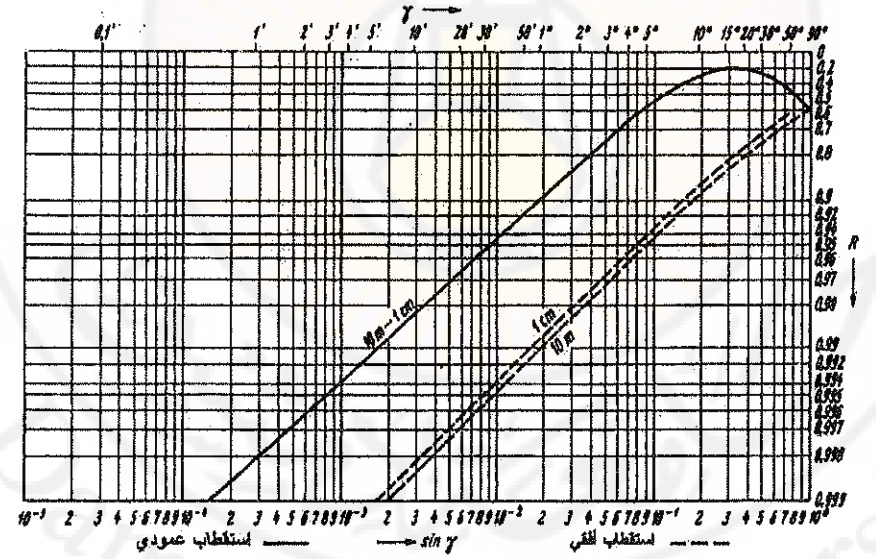
$$E = E_1 \sin\alpha - E_2 \sin\gamma \qquad (٧-١٧)$$



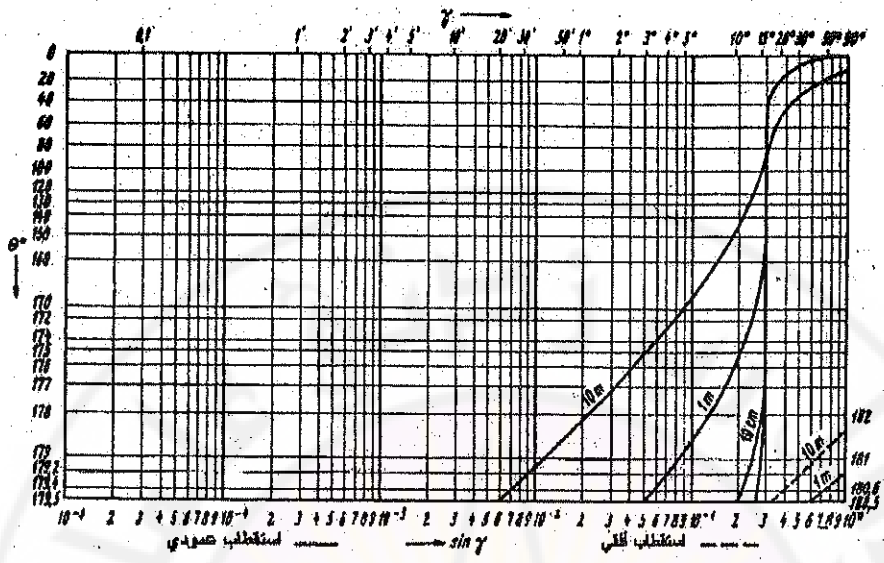
الشكل (٧-٤) : القيمة المطلقة لعامل الانعكاس R بعلاقة زاوية الميل γ عند الانعكاس على أرض جافة



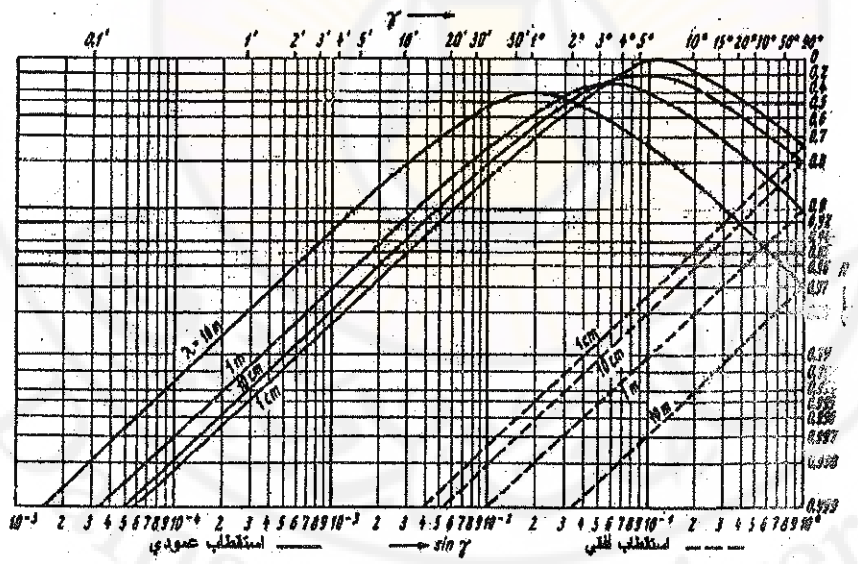
الشكل (٧-٥) : قيمة الانزياح في زاوية الطور خلال عملية الانعكاس θ بعلاقة زاوية الميل γ عند الانعكاس على أرض جافة



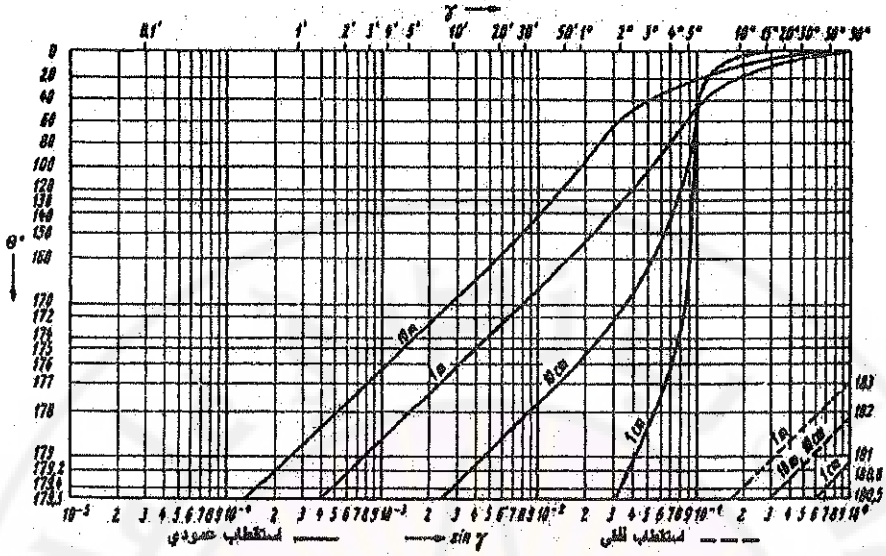
الشكل (٧-٦) : القيمة المطلقة لعامل الانعكاس R بعلاقة زاوية الميل γ عند الانعكاس على أرض رطبة



الشكل (٧-٧) : قيمة الانزياح في زاوية الطور خلال عملية الانعكاس θ بعلاقة زاوية الميل γ عند الانعكاس على أرض رطبة



الشكل (٧-٨) : القيمة المطلقة لعامل الانعكاس R بعلاقة زاوية الميل γ عند الانعكاس على مياه البحر



الشكل (٧-٩) : قيمة الانزياح في زاوية الطور خلال عملية الانعكاس θ بعلاقة زاوية الميل γ عند الانعكاس على مياه البحر

مثال ٧-١: تطبيق معادلتي الانعكاس بشكليهما العام

المطلوب حساب شدة الحقل في نقطة الاستقبال للقيم التالية وعندما يكون استقطاب الأمـواج أفقياً و عمودياً

الاستطاعة المشعة $P = 1.5\ W$

طول الموجة $\lambda = 1.2\ m$

ارتفاع هوائي الإرسال عن سطح الأرض $h_1 = 120\ m$

ارتفاع هوائي الاستقبال عن سطح الأرض $h_2 = 250\ m$

المسافة بين قاعدتي الهوائيين $r = 2\ Km$

المخطط الإشعاعي لهوائي الإرسال في المستوي العمودي معروف. منـه يتبـين أن عامـل توجيه الهوائي $G = 15$ ويقع باتجاه الشعاع المباشر. تنتشر الأمواج الكهرطيسية فوق أرض رطبة.

الحل :

نحدد أولاً القيم الهندسية الموجودة في المعادلتين العامتين للانعكـاس . بموجـب المعـادلات (٧-١٢) حتى (٧-١٦):

$$\tan\gamma = \frac{h_1 + h_2}{r} = \frac{120 + 250}{2000} = 0.185$$

$$\gamma = 10°30' \quad \rightarrow \quad \sin\gamma = 0.182 \quad \rightarrow \quad \cos\gamma = 0.983$$

$$r_1 = \sqrt{r^2 + (h_1 - h_2)^2} = \sqrt{2000^2 + 130^2} = 2004m$$

$$r_2 = \sqrt{r^2 + (h_1 + h_2)^2} = \sqrt{2000^2 + 370^2} = 2034m$$

$$\Delta r = \frac{2h_1h_2}{r} - \frac{h_1h_2}{r^3}(h_1^2 + h_2^2) = \frac{2 \cdot 120 \cdot 250}{2000} - \frac{120 \cdot 250}{2000^3}(120^2 + 250^2)$$

$$\Delta r = 30 - 0.28 = 29.72m$$

$$\tan\alpha = \frac{h_1 - h_2}{r} = \frac{120 - 250}{2000} = -0.065$$

$$\alpha = -3°40' \quad \rightarrow \quad \cos\alpha = 0.998$$

الزاوية بين الشعاع المباشر والشعاع المنعكس هي :

$$\chi = \gamma - \alpha = 10°30' + 3°40' = 14°10'$$

من المخطط الإشعاعي لهوائي الإرسال في المستوي العمودي نحدد درجة توجيه هوائي الإرسال باتجاه الشعاع المنعكس على الأرض بزاوية χ وهي G_2 =9 .

نحصل على القيمة المطلقة لعامل الانعكاس R والانزياح في زاوية الطور θ من المنحنيات البيانية المرسومة في الشكلين (٧-٦) و (٧-٧) ، حيث $\sin\gamma = 0.182$ و $\lambda = 1.2\ m$.

للاستقطاب الأفقي $\theta = 180°$ و $R = 0.88$

للاستقطاب العمودي $\theta = 177°$ و $R = 0.3$

نعوض القيم السابقة في المعادلة (٧-٩) فنحصل على القيمة الفعالة لشدة الحقل عندما يكون الاستقطاب أفقياً.

$$E_{eff} = \frac{173\sqrt{P_{/KW}G_1}}{r_{1/Km}} \times \sqrt{1 + R^2\left(\frac{r_1}{r_1 + \Delta r}\right)^2 \frac{G_2}{G_1} + 2R\left(\frac{r_1}{r_1 + \Delta r}\right)\sqrt{\frac{G_2}{G_1}}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r\right)}$$

$$E_{eff} = \frac{173\sqrt{1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 15}}{2} \times \sqrt{1 + 0.774 \cdot 0.97 \cdot 0.6 - 2 \cdot 0.88 \cdot 0.985 \cdot 0.774 \cdot 0.104}$$

$$E_{eff} = 14.8\,mV/m$$

ونعوض في المعادلة (٧-١١) فنحصل على القيمة الفعالة لشدة الحقل عندما يكون الاستقطاب عمودياً.

$$E_{eff} = \frac{173\sqrt{P_{/KW}G_1}}{r_{1/Km}}\left(\cos^2\alpha + \cos^2\gamma\, R^2\left(\frac{r_1}{r_1+\Delta r}\right)^2\frac{G_2}{G_1}\right.$$
$$\left. + 2\cos\alpha\cos\gamma\, R\left(\frac{r_1}{r_1+\Delta r}\right)\sqrt{\frac{G_2}{G_1}}\cdot\cos\left(\theta+\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r\right)\right)^{1/2}$$

$$E_{eff} = \frac{173\sqrt{1.5\cdot10^{-3}\cdot15}}{2}\times$$
$$\sqrt{0.996+0.966\cdot0.09\cdot0.97\cdot0.6-2\cdot0.998\cdot0.983\cdot0.3\cdot0.985\cdot0.774\cdot0.104}$$
$$E_{eff} = 12.9\,mV/m$$

تقريب أول لمعادلتي الانعكاس:

في أغلب الحالات العملية يكون ارتفاع الهوائيين أصغر بكثير من المسافة بينهما. لذلك يمكن تبسيط المعادلتين العامتين اللتين تم اشتقاقهما فيما سبق تبسيطاً جوهرياً.

بما أن $h_1 << r$ و $h_2 << r$ يمكن تقريب المعادلتين (٧-١٢) و (٧-١٥) بالشكل التالي:

$$\gamma \approx \frac{h_1+h_2}{r} \qquad (٧-١٢-أ)$$

$$\alpha \approx \frac{h_1-h_2}{r} \qquad (٧-١٥-أ)$$

ويمكن أن نكتفي بالحد الأول من المعادلة (٧-١٦) :

$$\Delta r \approx \frac{2h_1h_2}{r} \qquad (٧-١٦-أ)$$

وبما أن الزاويتين α و γ صغيرتان تكون الزاوية بين الشعاع المباشر والشعاع المنعكس على الأرض عند هوائي الإرسال χ صغيرة بحيث يمكن اعتبار عامل توجيه الهوائي G_1 مساوياً لـ G_2 .

وبما أن $\Delta r << r$ يمكن اعتبار :

$$\frac{r_1}{r_1+\Delta r} = 1$$

ويمكن استبدال r_1 الموجود في مخرج المعادلتين (٧-٩) و (٧-١١) بـ r .
بتعويض التقريبات السابقة في المعادلة (٧-٩) تصبح معادلة حساب شدة حقل الأمواج الكهرطيسية المستقطبة أفقياً بالشكل التالي:

$$E_{eff} = \frac{173\sqrt{P_{/KW}G_1}}{r_{/Km}}\sqrt{1+R^2+2R\cos(\theta+\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r)}[mV/m] \quad (٧-١٨)$$

ويمكن في حالة الأمواج الكهرطيسية المستقطبة عمودياً (معادلة ٧-١١) اعتبار أن $\cos\alpha \approx 1$ و $\cos\gamma \approx 1$ دون أضرار يذكر بدقة الحساب. ويصبح شكل المعادلة (٧-١١) بعد تعويض التقريبات السابقة فيها نفس شكل المعادلة (٧-١٨). ويجب الانتباه هنا إلى أن المعادلة (٧-١٨) تحدد الحقل الكهربائي الكلي في حالة استقطاب الأمواج أفقياً وتحدد المركبة العمودية للحقل الكهربائي في حالة استقطاب الأمواج عمودياً.
ومع أن الشكل الخارجي لمعادلتي حساب شدة الحقل هو نفسه للاستقطاب الأفقي والعمودي، إلا أنهما تختلفان في المضمون. تعوض في المعادلة (٧-١٨) في حالة الاستقطاب الأفقي قيمتا R و θ اللتان يتم الحصول عليهما من المنحنيات البيانية الخاصة بالاستقطاب الأفقي، بينما تعوض في المعادلة (٧-١٨) في حالة الاستقطاب العمودي قيمتا R و θ اللتان يتم الحصول عليهما من المنحنيات البيانية الخاصة بالاستقطاب العمودي.

مثال ٧-٢ : تطبيق المعادلة (٧-١٨) الخاصة بالتبسيط الأول
المطلوب حساب شدة الحقل المستقبلة للقيم التالية وعندما يكون استقطاب الأمواج أفقياً وعمودياً.
الاستطاعة المشعة $P = 15\ W$
طول الموجة $\lambda = 35\ cm$
ربح هوائي الإرسال $G = 80$
ارتفاع هوائي الإرسال عن سطح الأرض $h_1 = 80\ m$
ارتفاع هوائي الاستقبال عن سطح الأرض $h_2 = 20\ m$
المسافة بين قاعدتي الهوائيين $r = 8\ Km$
تنتشر الأمواج الكهرطيسية فوق أرض جافة

الحل :

نحسب زاوية الميل γ بموجب المعادلة (٧-١٢-أ).

$$\gamma = \frac{h_1 + h_2}{r} = \frac{100}{8000} = 0.012$$

ونحسب Δr بموجب المعادلة (٧-١٦-أ).

$$\Delta r = \frac{2h_1 h_2}{r} = \frac{2 \cdot 80 \cdot 20}{8000} = 0.4m$$

نحدد قيمتي R و θ من المنحنيات البيانية المرسومة في الشكلين (٧-٤) و (٧-٥) والخاصة بالأرض الجافة ولقيمتي $\gamma = 0.012$ و $\lambda = 35\ cm$ فنجد :

للاستقطاب الأفقي $\qquad R = 0.91 \qquad \theta = 180^\circ$

للاستقطاب العمودي $\qquad R = 0.7 \qquad \theta = 180^\circ$

بتعويض هذه القيم في المعادلة (٧-١٨) نحصل في حالة الاستقطاب الأفقي.

$$E_{eff} = \frac{173\sqrt{P_{/KW} G}}{r_{/Km}} \sqrt{1 + R^2 + 2R\cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r)} \quad [mV/m]$$

$$= \frac{173\sqrt{15 \cdot 10^{-3} \cdot 80}}{8} \sqrt{1 + 0.828 - 2 \cdot 0.91 \cdot 0.623} = 19.7 \quad mV/m$$

وفي حالة الاستقطاب العمودي

$$E_{eff} = \frac{173\sqrt{15 \cdot 10^{-3} \cdot 80}}{8} \sqrt{1 + 0.49 - 2 \cdot 0.7 \cdot 0.623} = 18.6 \quad mV/m$$

تقريب ثانٍ لمعادلتي الانعكاس : (تقريب المعادلة ٧-١٨)

يمكن في كثير من الحالات تبسيط المعادلة (٧-١٨) نظراً لأن $h_1 << r$ و $h_2 << r$. بذلك تكون γ صغيرة جداً بحيث يمكن اعتبار القيمة المطلقة لعامل الانعكاس R تساوي الواحد والانزياح في زاوية الطور يساو 180° (انظر المقطع١-٦). وينطبق ذلك بشكل أفضل على الإشعاع المستقطب أفقياً كما سيتبين لاحقاً.

بتعويض $R \approx 1$ و $\Theta = 180^0$ في المعادلة (٧-١٨) ينتج:

$$E_{eff} = \frac{173\sqrt{P_{/KW} G}}{r_{/Km}} \sqrt{1 + 1 - 2\cos\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r}$$

باستخدام العلاقة المثلثية $\cos\frac{\alpha}{2}=\sqrt{\frac{1}{2}(1-\cos\alpha)}$ وإجراء بعض التحويلات البسيطة ينتج:

$$E_{eff}=\frac{346\sqrt{P_{/KW}G}}{r_{/Km}}\left|\sin\frac{\pi}{\lambda}\Delta r\right| \quad [mV/m] \qquad (٧-١٩)$$

نعوض قيمة Δr من المعادلة (٧-١٦-أ) فينتج :

$$E_{eff}=\frac{346\sqrt{P_{/KW}G}}{r_{/Kmn}}\left|\sin(\frac{2\pi h_{1/m}h_{2/m}}{r_{/m}\lambda_{/m}})\right| \qquad (٧-١٩-أ)$$

نحول r من متر إلى كيلومتر ونعوض 2π بالدرجات فينتج :

$$E_{eff}=\frac{346\sqrt{P_{/KW}G}}{r_{/Km}}\left|\sin(\frac{0.360h_{1/m}h_{2/m}}{r_{/Km}\lambda_{/m}})^{\circ}\right| \qquad (٧-١٩-ب)$$

نضع فيما يلي الحدود التي يمكن فيها تطبيق المعادلة (٧-١٩)، أي نحدد أعلى قيمة للنسبة $\frac{h_1+h_2}{r}$ (قيمة زاوية الميل γ في المعادلة ٧-١٢-أ) تسمح باستخدام المعادلة (٧-١٩)، وبحيث تقدم هذه المعادلة الدقة الكافية في التطبيق العملي نتيجة اعتبار R≈1 و $\theta=180^{\circ}$. كل قيمة أدنى من هذه النسبة تسمح طبعاً باستخدام المعادلة (٧-١٩) وتقدم دقة أفضل.

لهذا الغرض نعالج ثلاثة أنواع من سطح الأرض وهي مياه البحر ($\varepsilon_r=80$ و $\sigma=4\frac{1}{\Omega m}$) والأرض الرطبة ($\varepsilon_r=10$ و $\sigma=0.01\frac{1}{\Omega m}$) والأرض الجافة ($\varepsilon_r=4$ و $\sigma=10^{-3}\frac{1}{\Omega m}$). أدرجت في الجدول (٧-١) أعلى قيم للنسبة $\frac{h_1+h_2}{r}$ التي تتحقق عندها المتراجحتين $0.95<R<1$ و $175^{\circ}<\theta<180^{\circ}$ لأنواع سطح الأرض الثلاثة.

يمكن من الجدول (٧-١) والمنحنيات البيانية التوصل إلى الاستنتاجات التالية:

- يتحقق الشرطان $R\approx1$ و $\theta\approx180^{\circ}$ بسهولة أكبر عندما يكون استقطاب الإشعاع أفقياً.
- يتحقق الشرط $\theta\approx180^{\circ}$ في جميع الحالات بسهولة أكبر من تحقق الشرط $R\approx1$.
- تصبح المعادلة (٧-١٩) في الاستقطاب العمودي أنسب للتطبيق العملي كلما صغر طول الموجة. أما في الاستقطاب الأفقي فلا تتغير تقريباً النسبة $\frac{h_1+h_2}{r}$ بتغير طول الموجة.

الجدول ٧-١ : حدود تطبيق المعادلة (٧-١٩) وهي أعلى قيم للنسبة $\frac{h_1+h_2}{r}$

لصحة اعتبار $R \approx 1$ و $\theta \approx 180^\circ$.

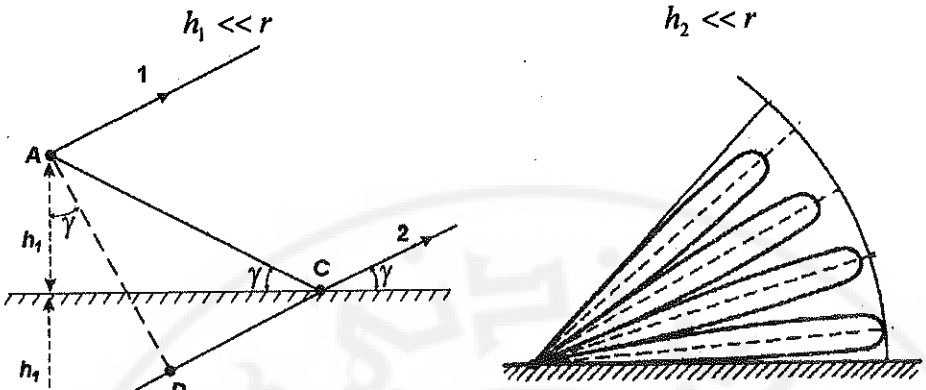
نوع الاستقطاب	الأرض الجافة		الأرض الرطبة		البحر		طول الموجة λ
	$\theta=180^0$	$R \approx 1$	$\theta=180^0$	$R \approx 1$	$\theta=180^0$	$R \approx 1$	
عمودي	0.25	10^{-2}	6.10^{-2}	8.10^{-3}	10^{-3}	8.10^{-4}	10 m
عمودي	0.45	10^{-2}	0.3	8.10^{-3}	0.1	3.10^{-3}	1 cm
أفقي	أي قيمة	0.045	أي قيمة	0.08	أي قيمة	أي قيمة	10 m
أفقي	أي قيمة	0.045	أي قيمة	0.08	أي قيمة	0.25	1 cm

- يؤدي انخفاض ناقلية الأرض إلى زيادة مجال تطبيق المعادلة (٧-١٩) في الاستقطاب العمودي. ونقع أسوأ الظروف عندما يتم الانتشار فوق البحر ولموجة طولها $10\ m$. عندها يمكن استخدام المعادلة (٧-١٩) عندما يتحقق الشرط $\frac{h_1+h_2}{r} < 8 \cdot 10^{-4}$، أي عندما يكون ارتفاع الهوائيين صغيراً أو عندما تكون المسافة r كبيرة. يعني وجود الحد $\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r}$ في المعادلة (٧-١٩) أنه تنشأ عدة حدود قصوى وحدود دنيا للتداخل في نقطة الاستقبال. ويجب بموجب هذه المعادلة أن يتألف المخطط الإشعاعي في المستوي العمودي من عدة لفات ولو استُعمل مشع نظري نقطي ربحه $G = 1$ كهوائي إرسال. ويبين الشكل (٧-١٠) المخطط الإشعاعي عديد اللفات لهوائي الإرسال العمودي في نقطة الاستقبال. ويساوي عدد اللفات حاصل قسمة ارتفاع المشع عن سطح الأرض على نصف طول الموجة ، أي $n = \frac{2h_1}{\lambda}$.

ولا يمكن التوصل إلى هذا الاستنتاج من المعادلة (٧-١٩) بشكل مباشر نظراً لأن هذه المعادلة صالحة فقط عند تحقق الفرضية التي انطلقنا منها في اشتقاقها، وهي :

إذا افترضنا أن هوائي الاستقبال موجود على مسافة كبيرة من هوائي الإرسال يمكننا اعتبار أن مساري الشعاع المباشر والشعاع المنعكس على سطح الأرض متوازيان دون إضرار يذكر بدقة الحساب (الشكل ٧-١١). ويمكن تحديد الفرق $\Delta r = A'D$ من الشكل مباشرة.

$$\Delta r = 2h_1 \sin\gamma$$



الشكل (٧-١٠) المخطط الإشعاعي في المستوي العمودي عند نقطة الاستقبال

الشكل ٧-١١ : لتحديد عدد لفات المخطط الإشعاعي

بتعويض قيمة Δr هذه في المعادلة $\sin\frac{\pi}{\lambda}\Delta r$ (معادلة ٧-١٩) نحصل :

$$\sin\frac{\pi}{\lambda}\Delta r = \sin(\frac{2\pi h_1}{\lambda}\sin\gamma) = \sin(n\pi\sin\gamma)$$

بتغيير γ من 0 إلى $\pi/2$ يأخذ التابع الجيبي القيمة العظمى n مرة ، وبذلك يكون قد تم إثبات صحة الفرضية حول عدد اللفات في المخطط الإشعاعي.

في حالة الاستقطاب الأفقي تظهر القيم العظمى والقيم الدنيا واضحة تماماً ، أما في حالة الاستقطاب العمودي فلا تكون بنفس الوضوح إذا كانت قيمة الحد R لا تساوي الواحد.

تقريب ثالث لمعادلتي الانعكاس :(تقريب المعادلة ٧-١٩)

عندما تكون قيم $\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r}$ صغيرة يمكن استبدال الجيب بالزاوية نفسها. بذلك تأخذ المعادلة (٧-١٩) الشكل الأبسط التالي:

$$E_{eff} = \frac{2.18\sqrt{P_{/KW}Gh_{1/m}h_{2/m}}}{r^2_{/Km}\lambda_{/m}} \qquad (٧-٢٠)$$

ولا يكفي لتطبيق هذه المعادلة تحقق الشرط الخاص بالمعادلة (٧-١٩) بل يجب أن تتحقق أيضاً المتراجحة التالية:

$$\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r} \le \frac{\pi}{9} \quad \rightarrow \quad h_1 h_2 \le \frac{r\lambda}{18} \qquad (٧-٢١)$$

وتحوي هذه المعادلة علاقة شدة الحقل بالمسافة وبطول الموجة وبارتفاعي الهوائيين عن

سطح الأرض بشكل واضح ، ولها أهمية خاصة في حسابات خطوط الاتصال اللاسلكي في مجال الأمواج القصيرة جداً.

من النظرة الأولى تظهر المعادلة (٧-٢٠) العلاقة العكسية بين محصلة الحقل ومربع المسافة، لذلك تسمى هذه المعادلة أيضاً " المعادلة التربيعية ". وتظهر هذه المعادلة أيضاً أن محصلة الحقل تتناسب عكساً مع طول الموجة وطرداً مع جداء ارتفاعي الهوائيين. ذلك يعني (في مجال صلاحية تطبيق المعادلة ٧-٢٠) أن إنقاص طول موجة التشغيل وزيادة ارتفاعي الهوائيين h_1 و h_2 يؤديان إلى زيادة قيمة محصلة الحقل.

مثال ٧-٣ : تطبيق المعادلة (٧-١٩) الخاصة بالتبسيط الثاني

المطلوب حساب شدة الحقل عند هوائي الاستقبال للقيم التالية :

الاستطاعة المشعة $P = 50\ W$

طول الموجة $\lambda = 10\ cm$

ربح هوائي الإرسال $G = 60$

ارتفاع هوائي الإرسال عن سطح الأرض $h_1 = 25\ m$

ارتفاع هوائي الاستقبال عن سطح الأرض $h_2 = 10\ m$

المسافة بين قاعدتي الهوائيين $r = 10\ Km$

تنتشر الأمواج فوق أرض رطبة

يشع هوائي الإرسال أمواجاً مستقطبة عمودياً

الحل :

نحدد أولاً المعادلة المناسبة لحساب شدة الحقل. نباشر باختبار تحقق شرط تطبيق التقريب الثالث (المعادلة ٧-٢٠). بالتعويض في المتراجحة (٧-٢١) نحصل :

$$\frac{r \cdot \lambda}{18} = \frac{10^4 \cdot 0.1}{18} = 55m^2 \qquad h_1 \cdot h_2 = 250m^2$$

منه يتبين أن المتراجحة (٧-٢١) غير محققة.

نختبر إمكانية التقريب الثاني (المعادلة ٧-١٩) $\frac{h_1 + h_2}{r} = 3.5 \cdot 10^{-3}$

من الجدول (٧-١) يتبين أن أقصى قيمة يمكن أن تأخذها $\frac{h_1 + h_2}{r}$ في حالة الاستقطاب

العمودي والانتشار فوق أرض رطبة ولطول موجة $10\ cm$ كشرط لإمكانية تطبيق المعادلة (٧-١٩) هي $8\cdot10^{-3}$ لـ R و $6\cdot10^{-2}$ لـ θ . منه يكون :

$$3.5\cdot10^{-3} < 8\cdot10^{-3}$$

نعوض القيم اللازمة في المعادلة (٧-١٩-ب) فينتج :

$$E_{eff} = \frac{346\sqrt{P_{/KW}G}}{r_{/Km}} \cdot \left|\sin(\frac{0.36h_{1/m}h_{2/m}}{r_{/Km}\lambda_{/m}})^{\circ}\right| \quad [mV/m]$$

$$= \frac{346\sqrt{50\cdot10^{-3}\cdot60}}{10} \cdot \left|\sin(\frac{0.36\cdot25\cdot10}{10\cdot10^{-2}})^{\circ}\right| = 60 \quad mV/m$$

مثال ٧-٤ : تطبيق المعادلة (٧-٢٠) الخاصة بالتبسيط الثالث

المطلوب حساب شدة الحقل في منطقة الاستقبال لنفس معطيات المثال (٧-٣) ولكن لطول موجة $\lambda = 1\ m$.

باختيار تحقق شرط تطبيق التقريب الثالث

$$h_1h_2 = 250m^2 < \frac{r\lambda}{18} = 550m^2$$

يتبين أن المتراجحة (٧-٢١) محققة ويمكن استخدام المعادلة (٧-٢٠) لحساب شدة الحقل.

بتعويض القيم اللازمة في المعادلة (٧-٢٠) ينتج:

$$E_{eff} = \frac{2.18\sqrt{P_{/KW}G}h_{1/m}h_{2/m}}{r^2_{/Km}\lambda_{/m}} = \frac{2.18\sqrt{50\cdot10^{-3}\cdot60}\cdot25\cdot10}{10^2\cdot1}$$

$$E_{eff} = 9.43mV/m$$

مسألة ٧-٥ :

يتم في نقطة الاستقبال التي تبعد المسافة r عن هوائي الإرسال قياس شدة حقل $16\mu V/m$. على مسافة ٦ كيلومتر من هذه النقطة وباتجاه هوائي الإرسال يتم قياس شدة حقل $25\mu V/m$. المطلوب حساب المسافة بين هوائي الإرسال ونقطة الاستقبال. المتراجحة $(h_1h_2 < r\cdot\lambda/18)$ محققة.

٢- هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال قريبان من سطح الأرض

تحسب شدة الحقل في منطقة الاستقبال بموجب المعادلتين (٢-١٧-آ) و (٢-١٧-ب) عندما يكون هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال موجودين على سطح الأرض مباشرة وعند اعتبار سطح الأرض بين الهوائيين القريبين الواحد من الآخر سطحاً مستوياً. ولا يمكن حساب شدة الحقل بموجب معادلات الانعكاس التي تم اشتقاقها إذا كان أحد الهوائيين (سواء كان هوائي الإرسال أو هوائي الاستقبال) موجوداً على سطح الأرض مباشرة ، نظراً لأن محصلة الحقل بموجب هذه المعادلات تساوي الصفر إذا عوضنا فيها h_1 أو h_2 مساوياً للصفر ، وهذا لا يطابق الواقع طبعاً.

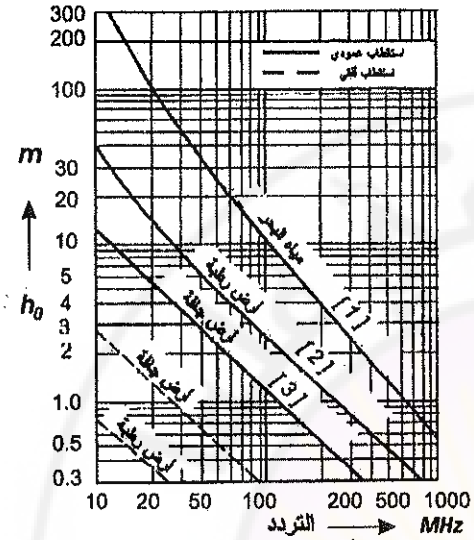
عند وجود أحد الهوائيين على سطح الأرض فلا يوجد شعاع منعكس وبالتالي لا يتحقق الشرط الذي انطلقنا منه في اشتقاق معادلات الانعكاس. إضافة إلى ذلك فإن معادلات الانعكاس هي معادلات تقريبية لحساب شدة الحقل المستقبلة ولا تقدم الدقة الكافية عندما يكون ارتفاع الهوائيات ضئيلاً. وتساوي محصلة الحقل في نقطة الاستقبال عندما يكون ارتفاع الهوائيات ضئيلاً إلى مجموع الحقل الناجم من الموجة المباشرة والحقل الناجم عن الموجة المنعكسة على سطح الأرض وحقل الموجة التي تتبع انحناء سطح الأرض (أنظر الشكل ١-٤١). ويحدث هنا امتصاص للموجة الأرضية في كامل مسارها إضافة إلى الامتصاص الذي تتعرض له الموجة المنعكسة في نقطة الانعكاس.

طور " Wwedenski " المعادلة (٢-٧٠) لتصبح صالحة لحساب شدة الحقل عندما تكون الهوائيات قريبة من سطح الأرض ، وهي بالشكل التالي :

$$E_{eff} = \frac{2.18\sqrt{P_{/KW}G}\sqrt{h_1^2+h_0^2}\sqrt{h_2^2+h_0^2}}{r_{/Km}^2\lambda_{/m}} \quad [mV/m] \qquad (٢٢-٧)$$

حيث h_0 " أقل ارتفاع فعال للهوائي" ، وتحدد قيمته في مجال الأمواج القصيرة جداً والميكروية ولنوعي الاستقطاب من المنحنيات المرسومة في الشكل (٧-١٢).وتخص هذه المنحنيات حالات الانتشار فوق مياه البحر والأرض الرطبة والأرض الجافة . تستعمل المعادلة (٧-٢٢) لحساب شدة الحقل عندما تكون $h_0 << h_2$ و $h_0 << h_1$. أما إذا كانت $h_0 >> h_1$ و $h_0 >> h_2$ فيصبح شكل المعادلة (٧-٢٢):

$$E_{eff} = \frac{2.18\sqrt{P_{/KW} G h_{0/m}^2}}{r_{/Km}^2 \lambda_{/m}} \qquad (٢٣-٧)$$



[1]: $\varepsilon_r = 80$, $\sigma = 4(\Omega m)^{-1}$
[2]: $\varepsilon_r = 30$, $\sigma = 0.02(\Omega m)^{-1}$
[3]: $\varepsilon_r = 4$, $\sigma = 10^{-3}(\Omega m)^{-1}$

الشكل (٧-١٢) : علاقة "أقل ارتفاع فعال للهوائي" بالتردد

وتظهر المعادلة (٧-٢٣) بأنه في حالة الهوائيات القريبة جداً من سطح الأرض لا تتعلق شدة الحقل المستقبلة بارتفاع هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال. ويتبين من الشكل (٧-١٢) بأنه في حالة انتشار الأمواج الكهرطيسية المستقطبة أفقياً فوق مياه البحر يمكن استعمال معادلات الانعكاس لجميع ارتفاعات الهوائيات بسبب ضآلة قيمة h_0 .

عند اختلاف القيم الكهربائية للأرض عن القيم المدرجة في الشكل (٧-١٢) يمكن تحديد أقل ارتفاع فعال للهوائي بموجب المعادلة :

$$h_0 = \frac{\lambda}{2\pi q} \qquad (٢٤-٧)$$

حيث تحدد قيمة q في حالة الاستقطاب العمودي بواسطة المعادلة :

$$q = \left| \frac{\varepsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2\gamma}{\varepsilon_r - j60\lambda\sigma} \right| \qquad (٢٥-٧)$$

وفي حالة الاستقطاب الأفقي بواسطة المعادلة :

$$q = \left| \sqrt{\varepsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2\gamma} \right| \qquad (٢٦-٧)$$

مثال ٧-٦ :

المطلوب حساب شدة الحقل المستقبلة للقيم التالية:

$h_2 = 4\ m$, $h_1 = 6\ m$, $r = 5\ Km$, $\lambda = 1\ m$, $G = 60$, $P = 50\ W$

الأمواج الكهرطيسية مستقطبة عمودياً وتنتشر فوق أرض رطبة.

الحل :

من الشكل (٧-١٢) نحصل على قيمة h_0 عندما يكون طول الموجة $\lambda = 1\ m$ ($f = 300\ MHz$) وعند الانتشار على أرض رطبة وعندما يكون الاستقطاب عمودياً ، وهي :

$$h_0 = 0.8m$$

نعوض في المعادلة (٧-٢٢) فينتج :

$$E_{eff} = \frac{2.18\sqrt{P_{/KW}G}\sqrt{h_1^2 + h_0^2}\sqrt{h_2^2 + h_0^2}}{r_{/Km}^2 \lambda_{/m}} \quad [mV/m]$$

$$E_{eff} = \frac{2.18\sqrt{50 \cdot 10^{-3} \cdot 60} \cdot \sqrt{6^2 + 0.8^2} \cdot \sqrt{4^2 + 0.8^2}}{25} = 3.73\,mV/m$$

وفي حالة عدم مراعاة تأثير قرب الهوائيات من سطح الأرض تكون شدة الحقل بموجب المعادلة (٧-٢٢):

$$E_{eff} = \frac{2.18\sqrt{P_{/KW}G}h_1 h_2}{r_{/Km}^2 \lambda_{/m}} = \frac{2.18\sqrt{50 \cdot 10^{-3} \cdot 60} \cdot 6 \cdot 4}{25} = 3.62\,mV/m$$

٧-٥ انتشار الأمواج القصيرة جداً والميكروية على الأرض الكروية ولمسافات لا تتجاوز مدى خط النظر

تمت حتى الآن معالجة انتشار الأمواج الكهرطيسية في مجال الأمواج القصيرة جداً والميكروية على أرض مستوية. ومن الواضح أننا نستطيع اعتبار الأرض مستوية فقط عندما لا تتجاوز المسافات بين نقطتي الاتصال اللاسلكي بضعة كيلومترات. ويجب حتماً مراعاة تأثير انحناء سطح الأرض عندما يتم الاتصال اللاسلكي على مسافات أكبر من تلك المسافات. ولانحناء سطح الأرض تأثيرات عديدة على انتشار الأمواج القصيرة جداً والميكروية، وهي :

١- يقلل انحناء سطح الأرض من مدى خط النظر الذي يتعلق بارتفاع هوائيي الإرسال والاستقبال. ويكون للحقل المستقبل ضمن مدى خط النظر وعندما يكون ارتفاع الهوائيين كافياً تركيب تداخلي يمكن تحديده بواسطة معادلات الانعكاس. ولا يمكن استعمال معادلات الانعكاس قطعياً عند الانتشار خارج مدى خط النظر. عند الانتشار ضمن مدى خط النظر ولارتفاعين محددين للهوائيين، تختلف قيمة الفرق في المسافة بين الشعاع المباشر والشعاع المنعكس Δr في حالة الأرض المنحنية عنها في حالة اعتبار الأرض مستوية والمحددة

بموجب المعادلة (٧- ١٦-آ).

٢- يرافق عملية الانعكاس على سطح الأرض المنحني تبعثر ما للقذرة نظراً لأن الأمواج في هذه الحالة لا تعكس من سطح مستو بل من سطح محدب، مما يسبب إضعاف حقل الأمواج المنعكسة.

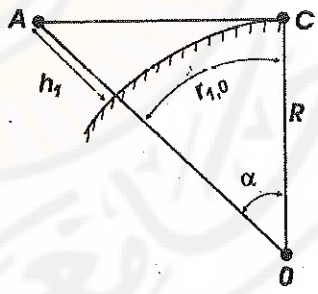
٣- تختلف ظروف انتشار الأمواج الأرضية على أرض محدبة عنها على أرض مستوية. وبسبب ظاهرة الانحناء يستطيع جزء من الأمواج الكهرطيسية اتباع انحناء سطح الأرض والوصول إلى نقاط موجودة خارج مدى خط النظر.

٤- عند الانتشار لمسافات تستدعي مراعاة انحناء سطح الأرض، يجب الانتباه إلى أن الأمواج الكهرطيسية لا تنتشر على مسار مستقيم بسبب ظاهرة الانكسار الجوي. ويجب مراعاة تأثير الانكسار الجوي بالإضافة إلى تأثير انحناء سطح الأرض.

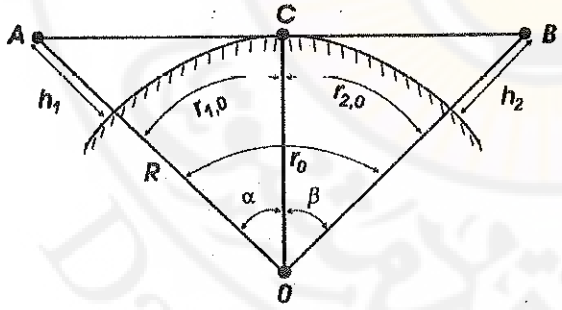
١- مدى خط النظر

يبين الشكل (٧-١٤) مدى خط النظر لشعاع منطلق من النقطة A الموجودة على ارتفاع h_1 من سطح الأرض إلى النقطة B الموجودة على سطح الأرض مباشرة. من المثلث القائم OAC نكتب :

$$\cos\alpha = \frac{R}{R+h_1} \quad \rightarrow \quad \sin\alpha = \sqrt{1-(\frac{R}{R+h_1})^2} = \frac{\sqrt{2Rh_1+h_1^2}}{R+h_1}$$



الشكل ٧-١٣ : لتحديد مدى خط النظر بين النقطتين A وC .



الشكل ٧-١٤ : لتحديد مدى خط النظر عندما يكون كلا الهوائيين مرتفعين عن سطح الأرض.

وبما أن الزاوية المركزية α صغيرة جداً، يمكن استبدال جيب الزاوية بالزاوية نفسها. ويمكن

إهمال h_1 بالمقارنة مع R . منه ينتج :

$$\alpha \approx \frac{\sqrt{2Rh_1}}{R} \qquad (٢٧-٧)$$

وبما أن $\alpha = \frac{r_{1,0}}{R}$ نحصل من مساواتها مع المعادلة (٧-٢٧) على المعادلة التالية :

$$r_{1,0} = \sqrt{2Rh_1} \qquad (٢٨-٧)$$

نعوض في هذه المعادلة قيمة نصف قطر الكرة الأرضية $R = 6.37 \cdot 10^6 m$ ونحول r من متر إلى كيلومتر فتصبح :

$$r_{1,0} = 3.57\sqrt{h_{1/m}} \quad [Km] \qquad (٢٨-٧-أ)$$

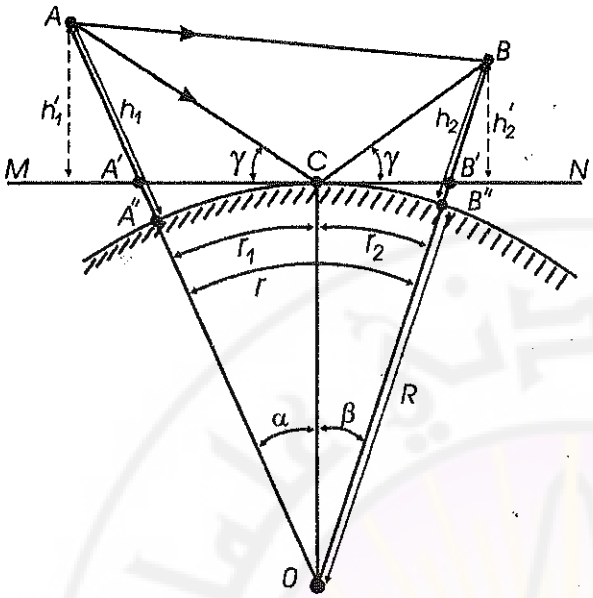
ويمكن تعميم هذه المعادلة بحيث تحدد مدى خط النظر عندما يكون كلا الهوائيين مرتفعين عن سطح الأرض كما هو مبين في الشكل(٧-١٤) .

$$r_0 = r_{1,0} + r_{2,0} = \sqrt{2R}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \qquad (٢٩-٧-أ)$$

$$r_0 = 3.57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad [Km] \qquad (٢٩-٧-ب)$$

٢- مراعاة انحناء سطح الأرض عند تطبيق معادلات الانعكاس

يبين الشكل (٧-١٥) حالة انتشار شعاع مباشر وشعاع منعكس على سطح الأرض المحدب. فإذا رسمنا في نقطة انعكاس الأمواج الكهرطيسية على سطح الأرض سطحاً مماساً لكرة الأرض MN واعتبرنا ارتفاع الهوائيين من هذا المستوي وليس من سطح الأرض نحصل على "الارتفاعين النسبيين" h_1' و h_2'. بتعويض هذين الارتفاعين بدلاً من الارتفاعين الهندسيين h_1 و h_2 في معادلات الانعكاس نحصل على القيمة الصحيحة للفرق بين طولي طريقي الشعاعين المباشر وغير المباشر Δr ، وبذلك القيمة الصحيحة لشدة الحقل المستقبلة. باستعمال الارتفاعين النسبيين بدلاً من الارتفاعين الهندسيين يمكن تعميم جميع طرق حساب شدة الحقل على الأرض المستوية (والمعالجة في المقطع السابق) واستعمالها لحساب شدة الحقل على الأرض المحدبة. لذلك من الضروري تحديد قيمتي الارتفاعين النسبيين h_1' و h_2' بعلاقة القيم المعطاة r و h_1 و h_2 .



الشكل ٧-١٥ : لحساب Δr عند الانتشار على سطح أرض منحنٍ

يمثل الشكل (٧-١٥) حالة هوائيين مرتفعين ارتفاعاً غير واقعي عن سطح الأرض، ولا تطابق القيم h_1 و h_2 و r و R المبينة في الشكل القيم الواقعية في الحياة العملية قطعياً. وقد رسمت هذه الأبعاد بهذا الشكل للتمكن من توضيح الأفكار والعلاقات الهندسية بسهولة. في الحقيقة لا توجد زاوية تذكر بين الارتفاعين h_1 و h_1'.

بذلك يمكن اعتبار أن :

$$\left.\begin{aligned} h_1' &= h_1 - \Delta h_1 \\ h_2' &= h_2 - \Delta h_2 \end{aligned}\right\} \qquad (٧-٣٠)$$

حيث $\Delta h_1 = A'A''$ و $\Delta h_2 = B'B''$.

بموجب المعادلة (٧-٢٨) يمكننا أن نكتب :

$$\Delta h_2 = \frac{r_2^2}{2R} \qquad \Delta h_1 = \frac{r_1^2}{2R}$$

نعوض في المعادلتين (٧-٣٠) فينتج :

$$h_2' = h_2 - \frac{r_2^2}{2R} \qquad h_1' = h_1 - \frac{r_1^2}{2R} \qquad (٧-٣١)$$

نعوض $R = 6.37 \cdot 10^6 m$ ونحول r من متر إلى كيلومتر فتصبح المعادلتان (٧-٣١) :

$$h_2' = h_{2/m} - \frac{r_{2/Km}^2}{12.8}[m] \qquad h_1' = h_{1/m} - \frac{r_{1/Km}^2}{12.8}[m] \qquad (٧-٣٢)$$

يمكننا الآن حساب الإرتفاعين النسبيين h_1' و h_2' إذا عرفنا موقع النقطة C ، أي مقدار المسافتين r_1 و r_2 .

بما أن زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس في النقطة C (شكل ٧-١٥) يمكننا أن نكتب

المعادلتين التاليتين من المثلثين OAC و OCB .

$$\left.\begin{aligned}(R+h_1)\cos(\gamma+\alpha)&=R\cos\gamma\\(R+h_2)\cos(\gamma+\beta)&=R\cos\gamma\end{aligned}\right\} \qquad (٣٣-٧)$$

نحل كلتا المعادلتين بالنسبة لـــ $tan\,\gamma$ ونساويهما الواحدة بالأخرى فينتج :

$$\tan\gamma=\frac{\cos\alpha-\dfrac{R}{R+h_1}}{\sin\alpha}=\frac{\cos\beta-\dfrac{R}{R+h_2}}{\sin\beta} \qquad (٣٤-٧)$$

علماً بأن الزاوية γ هي الزاوية ACM و الزاوية BCN .

هذه المعادلة دقيقة جداً نظراً لأنه لم يتم إجراء أي تقريب في اشتقاقها. ولا يمكن حـل هـذه المعادلة تحليلياً ولكن يمكن حلها بيانياً عند الحاجة.

يمكن تبسيط المعادلة (٣٤-٧) من منطلق أن $R>>h_1$ و $R>>h_2$ دون الإضرار بدقـة الحساب اللازمة، بذلك يمكن اعتبار أن :

$$\frac{R}{R+h_1}\approx 1-\frac{h_1}{R} \qquad \text{و} \qquad \frac{R}{R+h_2}\approx 1-\frac{h_2}{R}$$

إذا عوضنا إضافة لذلك جيب الزاوية المركزية الصغيرة بالزاوية نفسها، واستخدمنا التقريبين

$$\cos\alpha\approx 1-\frac{\alpha^2}{2} \qquad \text{و} \qquad \cos\beta\approx 1-\frac{\beta^2}{2}$$

يمكننا كتابة المعادلة (٣٤-٧) بالشكل التالي :

$$\tan\gamma=\frac{\dfrac{h_1}{R}-\dfrac{\alpha^2}{2}}{\alpha}=\frac{\dfrac{h_2}{R}-\dfrac{\beta^2}{2}}{\beta}$$

نعوض الزاويتين المركزيتين الصغيرتين α وβ بعلاقـة المسـافتين r_1 و r_2 ($\alpha=r_1/R$ و $\beta=r_2/R$) فينتج :

$$\tan\gamma=\frac{h_1-\dfrac{r_1^2}{2R}}{r_1}=\frac{h_2-\dfrac{r_2^2}{2R}}{r_2} \qquad (٣٥-٧)$$

حيث $r=r_1+r_2$

نميز في المعادلة (٣٥-٧) الحالتين الحديتين التاليتين :

١- هوائيات مرتفعة عن سطح الأرض ، بالتـالي قـيم الزاويـة γ كبيـرة نسـبياً، أي أن

$h_1 >> \frac{r_1^2}{2R}$ و $h_2 >> \frac{r_2^2}{2R}$. بذلك تصبح المعادلة (٧-٣٥) $\tan\gamma = \frac{h_1}{r_1} = \frac{h_2}{r_2}$. منه ينتج ما يلي :

$$r_2 = r\frac{h_2}{h_1 + h_2} \qquad \text{و} \qquad r_1 = r\frac{h_1}{h_1 + h_2} \qquad (٧-٣٦)$$

تكافئ هذه النتيجة حالة الانتشار على سطح أرض مستو، أي $R \to \infty$.

٢- هوائيات قريبة من سطح الأرض ، بالتالي قيم الزاوية γ صغيرة جداً .

عندها نحصل من المعادلة (٧-٣٥) على العلاقتين التاليتين :

$$h_2 = \frac{r_2^2}{2R} \qquad \text{و} \qquad h_1 = \frac{r_1^2}{2R}$$

منه يكون :

$$r_2 = \sqrt{2R \cdot h_2} \qquad \text{و} \qquad r_1 = \sqrt{2R \cdot h_1}$$

وبالتالي :

$$r = r_1 + r_2 = \sqrt{2R} \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

$$r_2 = r\frac{\sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}} \qquad \text{و} \qquad r_1 = r\frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}} \qquad (٧-٣٧)$$

تكافئ هذه النتيجة حالة مدى خط النظر للارتفاعين h_1 و h_2 ، أي $\gamma \to 0$.

أما بالنسبة لقيم زوايا الميل الواقعة بين $\gamma \to 0$ و γ كبيرة جداً فتأخذ المسافتان r_1 و r_2 قيماً بين القيمتين الحديتين المحددتين بموجب المعادلتين (٧-٣٦) و (٧-٣٧) .

في الحسابات العملية نتبع الطريقة التالية في تحديد قيمتي r_1 و r_2 .

١- إذا كان طول خط الاتصال اللاسلكي r أصغر بكثير من مدى خط النظر r_0 المحسوب للارتفاعين h_1 و h_2 تحسب المسافتان r_1 و r_2 بموجب المعادلة (٧-٣٦) .

٢- إذا كان طول خط الاتصال اللاسلكي r قريباً من مدى خط النظر r_0 المحسوب للارتفاعين h_1 و h_2 تحسب المسافتان r_1 و r_2 بموجب المعادلة (٧-٣٧) .

٣- بالنسبة للقيم البينية الأخرى تؤخذ القيمة المتوسطة للقيمتين المحددتين بموجب المعادلتين (٧-٣٦) و (٧-٣٧) وبحيث تتحقق المعادلة $r = r_1 + r_2$.

مثال ٧-٧ :

المطلوب تحديد تأثير انحناء سطح الأرض عند حساب شدة الحقل المستقبلة للقيم المعطاة في المثال (٧-٤).

$$P = 50W, \quad \lambda = 1m, \quad G = 60, \quad h_1 = 25m, \quad h_2 = 10m, \quad r = 10Km$$

استقطاب الأمواج عمودي ويتم الانتشار فوق أرض رطبة .

الحل :

تم في المثال (٧-٤) اعتبار سطح الأرض مستوياً وكانت قيمة شدة الحقل المحسوبة $E_{eff1} = 9.43mV/m$.

نحسب الآن مدى خط النظر بموجب المعادلة (٧-٢٩) ونقارنه بطول خط الاتصال اللاسلكي.

$$r_0 = r_{1,0} + r_{2,0} = \sqrt{2R} \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = 3.57(\sqrt{25} + \sqrt{10}) = 29.1Km$$

منه يتبين بأن طول خط الاتصال اللاسلكي $r = 10Km$ يساوي إلى ثلث مدى خط النظر تقريباً . نفترض بأنه يمكن بالتقريب الأول حساب r_1 و r_2 بموجب المعادلتين (٧-٣٦).

$$r_1 = r\frac{h_1}{h_1 + h_2} = 10\frac{25}{25+10} = 7.14Km$$

$$r_2 = r\frac{h_2}{h_1 + h_2} = 10\frac{10}{25+10} = 2.86Km$$

نعوض قيمتي r_1 و r_2 في المعادلتين (٧-٣٢) فنحصل على الارتفاعين النسبيين .

$$h_1' = h_1 - \frac{r_1^2}{12.8} = 25 - \frac{7.14^2}{12.8} = 21m$$

$$h_2' = h_2 - \frac{r_2^2}{12.8} = 10 - \frac{2.86^2}{12.8} = 9.36m$$

نعوض في المعادلة (٧-٢٠) فنحصل على شدة الحقل في منطقة الاستقبال .

$$E_{eff2} = \frac{2.18\sqrt{P_{/KW}G}h_{1/m}'h_{2/m}'}{r_{/Km}^2\lambda_{/m}} = \frac{2.18\sqrt{0.05 \cdot 60} \cdot 21 \cdot 9.36}{100 \cdot 1} = 7.42mV/m$$

وتكون نسبة شدة الحقل عند مراعاة انحناء سطح الأرض إلى شدة الحقل عند اعتبار سطح الأرض مستوياً :

$$\frac{E_{eff1}}{E_{eff2}} = \frac{h_1'h_2'}{h_1h_2} = \frac{7.42}{9.43} = \frac{21 \cdot 9.36}{25 \cdot 10} = 0.788$$

وتكون E_{eff2} أصغر E_{eff1} ، أي يكون الخطأ بالنسبة المئوية :

$$\frac{E_{eff1}-E_{eff2}}{E_{eff1}}=\frac{h_1h_2-h_1'h_2'}{h_1h_2}=\frac{250-196{,}56}{250}=0.212\triangleq 21.2\%$$

مسألة ٧- ٨ :

يشع هوائي إرسال عمودي موجود على ارتفاع $25\ m$ من سطح الأرض استطاعة قدرها $18\ W$ بتردد $300\ MHz$. هوائي الاستقبال موجود على ارتفاع $10\ m$ وعلى بعد $10\ Km$ من هوائي الإرسال.

هل يمكن تحقيق اتصال لاسلكي موثوق إذا كانت هناك حاجة إلى شدة حقل قدرها $1\ mV/m$ على الأقل عند هوائي الاستقبال.

مسألة ٧- ٩ :

يشع هوائي إرسال موجود على ارتفاع $25\ m$ من سطح الأرض موجة طولها $1m$ باستطاعة قدرها $20W$. ربح هوائي الإرسال 20 واستقطابه عمودي. احسب شدة الحقل عند هوائي استقبال موجود على ارتفاع $10m$ من سطح الأرض إذا كانت المسافة بين الهوائيين $15km$ وكانت الأرض بين الهوائيين أرضاً رطبة.

الجزء الثاني

الهوائيـــات

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الأول

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

١- الهوائي الديبول

١-١ الهوائي الديبول كدارة طنين مفرودة

مهمة الهوائي هي إشعاع القدرة الكهربائية القادمة إليه من جهاز الإرسال في الجو المحيط به كقدرة كهرطيسية، أو استقبال القدرة الكهرطيسية من الجو المحيط به وتقديمها كجهد كهربائي إلى جهاز الاستقبال.

نعالج أولاً الشروط التي تمكن القدرة الكهربائية القادمة إلى الهوائي من مغادرة سلك الهوائي والانتشار على شكل أمواج كهرطيسية في أنحاء الجو المحيط بالهوائي.

إذا أريد لشكل هوائي ما أن يكون مشعاً جيداً وجب :

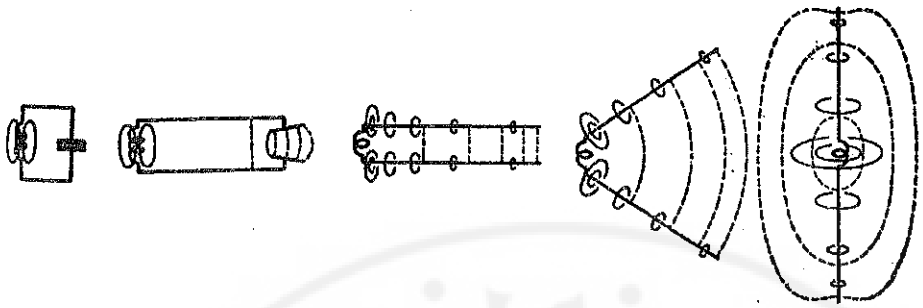
١- أن تملأ حقوله الكهربائية و المغناطيسية أكبر مجال ممكن من الجو المحيط بالهوائي.

٢- أن تكون هذه الحقول شديدة قدر الإمكان.

يمكن التوصل إلى حقول شديدة بوصل تحريض L كحامل للحقل المغناطيسي وسعة C كحامل للحقل الكهربائي مشكلين دارة طنين تحرض بتردد مساو لترددها الذاتي. عندها يسري في عنصري الدارة تيار أعظمي ويهبط عليهما جهدان أعظميان بمجرد تغذية الدارة باستطاعة ضئيلة. ومن غير الوارد استعمال مكثف وملف عاديين لمهمة الإشعاع في الجو. لقد صمم كلاهما وبقصد بحيث تبقى خطوط الحقل الكهربائي مجتمعة ضمن مجال ضيق قدر الامكان بين صفيحتي المكثف، وتبقى خطوط الحقل المغناطيسي في الملف محصورة ضمن لفات الملف.

ولكي تتحرر القدرة الكهرطيسية من سلك هوائي الإرسال وتنتشر إلى عمق الفضاء الحر يجب أن تتوزع السعات والتحريضات المركزة على امتداد سلك الهوائي بحيث تنشأ خطوط حقل كثيرة وبعيدة بعضها عن بعض قدر الامكان. إلا أن مجرد ملء مجالات كبيرة في الجو المحيط بالهوائي بخطوط الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي لا يعطي توضيحاً كاملاً لانتشار القدرة ، لكنه يشكل شرطاً أساسياً لهذا الانتشار، وستتم في مقطع لاحق توضيح كيفية انتشار القدرة الكهرطيسية بعيداً عن سلك الهوائي.

يوضح الشكل (١-١) الانتقال التدريجي من سعة وتحريض دارة طنين مركزة (مغلقة) إلى سعة وتحريض دارة طنين مفرودة (مفتوحة) ذات خطوط حقل كهربائي ومغناطيسي كثيرة ومتباعدة بعضها عن بعض. بذلك ينشأ هوائي ديبول قادر على الإشعاع.



آ ب جـ

الشكل ١-١ : الانتقال من دارة الطنين المركزة إلى دارة الطنين المفرودة

آ- دارة طنين تفرعية مركزة ب- ناقل تردد عالٍ بطول λ/4 جـ- هوائي ديبول

كما هي الحال في دارة الطنين التفرعية العادية حيث لا تتشكل الحقول الكهربائية والحقول المغناطيسية معاً بل منزاحة بعضها عن بعض بمقدار ربع دورة، لا تنشأ في دارة الطنين المفرودة الحقول الكهربائية والمغناطيسية معاً بنفس الوقت بل بالتناوب زمنياً.

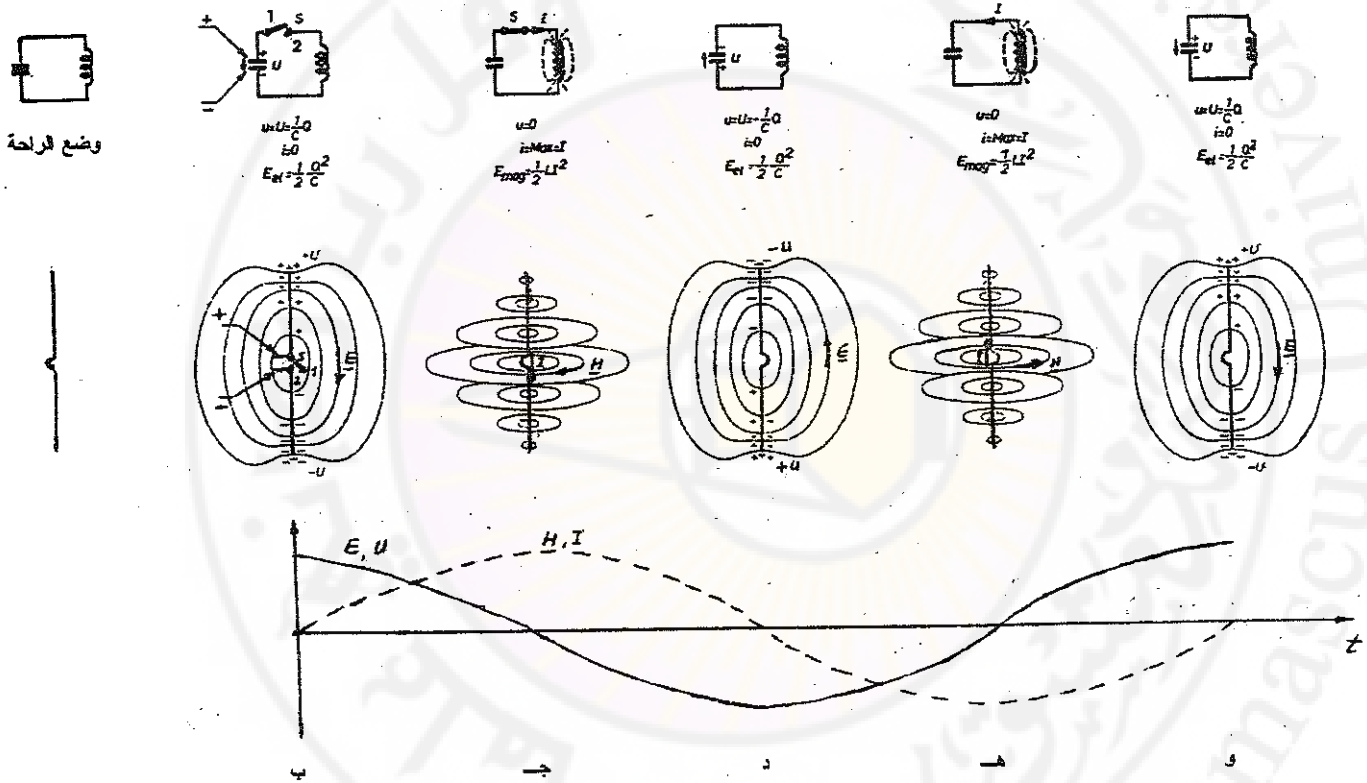
١-٢ الاهتزاز في دارة الطنين المركزة ودارة الطنين المفرودة (الهوائي الديبول)

يسبب التتابع الزمني لنشوء كل من الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي في الهوائي الديبول صعوبة ما في فهم طريقة الإشعاع من الهوائي. لذلك نقارن فيما يلي بين الاهتزاز الحر في دارة الطنين المركزة (المغلقة) وفي دارة الطنين المفرودة (المفتوحة) لفهم هذا التتابع، وبالتالي كيفية إشعاع القدرة الكهرطيسية من الهوائي.

يوضح الشكل (١-٢) المراحل المتتالية للحوادث الكهربائية في كلتا الدارتين.

الشكل (آ) : كلتا الدارتين موجودة في حالة سكون (وضع الراحة) ولا يوجد فيهما أي جهد أو تيار.

الشكل (ب) : تحرض الدارتان لمرة واحدة وذلك بشحن المكثف والهوائي إلى الجهد u ، حيث المفتاح S موجود في الوضعية ١، وبالتالي دارتا الاهتزاز غير مغلقتين. تمتلك الآن كلتا الدارتين القدرة الكهربائية $E_{el.} = Q^2/2C = C \cdot u^2/2$. وتكون خطوط الحقل الكهربائي محصورة بين صفيحتي المكثف ومتجهة من الطرف الموجب إلى الطرف السالب، ويكون طرفا الديبول مشحونين بشحنتين متعاكستين وتتجه خطوط الحقل الكهربائي من الطرف العلوي ذي الشحنة الموجبة إلى الطرف السفلي ذي الشحنة السالبة.



الشكل ١-٢ : لتوضيح المراحل المتتالية للاهتزاز في دارة طنين مركزة (مغلقة) ودارة طنين مفردة (مفتوحة) .

الشكل (جـ) : عند تحريك المفتاح S إلى الوضعية ٢ يبدأ المكثف بتفريغ شحنته خلال الملف ويتلاشى بذلك حقله الكهربائي بعد ربع دورة. مقابل ذلك يبني التيار في الملف حقلاً مغناطيسياً قوياً. في هذه اللحظة تكون القدرة الكهربائية الأصلية للمكثف $E_{el.}$ قد حولت نفسها إلى قدرة مغناطيسية في الملف $E_{mag.}=LI^2/2$. ويحدث نفس الشيء في الديبول حيث يسري تيار كهربائي من الطرف العلوي الموجب إلى الطرف السفلي السالب حيث يتلاشى الحقل الكهربائي بين طرفي الديبول بعد ربع دورة . مقابل ذلك يبني التيار في منتصف الديبول حقلاً مغناطيسياً قوياً . بذلك وبعد ربع دورة تكون القدرة الكهربائية الأصلية بين طرفي الديبول $E_{el.}$ قد حولت نفسها إلى قدرة مغناطيسية $E_{mag.}$ في منتصف الديبول .

وبما أن للتيار والحقل المغناطيسي عطالة ما ، لا يتوقف التيار فجأة عن السريان عند وصول جهد المكثف إلى الصفر ، بل يستمر بالسريان في الاتجاه نفسه لفترة ما وذلك بسبب التأثير التحريضي للحقل المغناطيسي المتناقص . ويعمل التأثير التحريضي على عرقلة بناء الحقل . خلال ذلك يشحن التيار المكثف بقطبية معاكسة للقطبية الأصلية.ويعمل الجهد المعاكس الناشئ تدريجياً على المكثف على إنقاص قيمة التيار تدريجياً حتى يصل إلى الصفر . ويحدث نفس الشيء في الهوائي الديبول .

الشكل (د): هنا يتم الوصول إلى الوضعين النهائيين للنصف الأول من دورة الاهتزاز وقد حولت قدرة كلتا الدارتين شكلها مرة أخرى من قدرة مغناطيسية إلى قدرة كهربائية بشكلها الأصلي .

الشكل (هـ) : تتم عملية تحويل القدرة بشكل معاكس لما تمت عليه في الشكلين (ب) و(جـ)، أي من الشكل الكهربائي إلى الشكل المغناطيسي .

الشكل (و) : يتم الوصول إلى وضع الانطلاق كما هو مبين في الشكل (ب) بعد إتمام دورة اهتزاز كاملة .

مما سبق يتبين مايلي :

١- هناك تحول مستمر للقدرة بين شكلها الكهربائي $E_{d.}=\frac{1}{2}cu^2=\frac{1}{2}\frac{Q^2}{c}$ وشكلها المغناطيسي $E_{mag.}=\frac{1}{2}LI^2$ وذلك كل ربع دورة اهتزاز . ولا تتشكل القيمة العظمى للحقل الكهربائي والقيمة العظمى للحقل المغناطيسي بنفس الوقت بل تكونان منزاحتين الواحدة عن

الأخرى زمنياً بمقدار ربع دورة اهتزاز، أي بمقدار ٩٠ درجة .

٢-بالإضافة إلى الانزياح الزمني بين الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي يوجد انزياح فراغي بينهما بمقدار ٩٠ درجة .

٣-تتأرجح القدرة في دارة الاهتزاز المركزة ضمن الدارة ، بعكس ذلك تتأرجح القدرة في دارة الاهتزاز المفرودة خارج الدارة مما يسبب إشعاع قدرة كهرطيسية في الجو المحيط في الدارة .

٤- يمتلك الجهد والتيار في لحظة ما قيماً مختلفة في المواضع المختلفة على الهوائي الديبول.

٥- جهد أي نقطة في الديبول هو فرق الكمون بين هذه النقطة والنقطة المناظرة لها على الديبول ، أي النقطة التي لها نفس البعد من منتصف الديبول على طرفه الآخر .

٦- التيار في نقطة ما في الديبول هو نفس التيار في النقطة المناظرة لها على الديبول من حيث القيمة والاتجاه .

٧- قيمة الحقل المغناطيسي والتيار في منتصف الديبول أعظمية وعند نهايتي الديبول تساوي الصفر .

٨- قيمة الحقل الكهربائي والجهد عند نهايتي الديبول أعظمية وفي منتصف الديبول تساوي الصفر ، نظراً لأن الدارة عديمة الضياع .

٩- يمثل منحني تغير الحقل المغناطيسي بعلاقة الزمن تغير التيار بعلاقة الزمن أيضاً (المنحني المرسوم بخط متقطع في الشكل ١-٢) .

١٠- يمثل منحني تغير الحقل الكهربائي بعلاقة تغير الجهد بعلاقة الزمن أيضاً (المنحني المرسوم بخط مستمر في الشكل ١-٢) .

١-٣ الحقل القريب والحقل البعيد

في دارة الطنين المثالية الناجمة عن توصيل سعة C وتحريض L ، سواء كانت دارة طنين مركزة أو مفرودة، تتأرجح القدرة الكهربائية بين قدرة حقل كهربائي وقدرة حقل مغناطيسي بالتناوب في كل ربع دورة من دورات الاهتزاز الكهربائي. ويمكن القول إنّ خطوط الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي في هذه الحالة مرتبطة بسلك الهوائي ولا تغادره منتشرة في الجو المحيط بالهوائي. تسمى هذه القدرة " القدرة التخيلية " المتأرجحة بين السعة والتحريض. بكلمات أخرى يوجد بين الجهد والتيار في هذه الدارة فرق في زاوية الطور مقداره ٩٠

درجة. بذلك لايتم تحويل القدرة الكهربائية في هذه الدارة إلى شكل آخر من أشكال القدرة. يسمى الحقل الكهرطيسي في هذه الحالة " الحقل القريب " .

في دارة الطنين العملية الناجمة عن توصيل مكثف وملف يوجد في دارتي الطنين المركزة والمفرودة بالإضافة إلى السعة والتحريض أيضاً مقاومة أومية R حيث الجهد الهابط عليها والتيار المار فيها متفقان في زاوية الطور، أي E و H متفقان في زاوية الطور ويتشكلان ويزولان معاً بآن واحد. بذلك يكون الفرق في زاوية الطور بين الجهد والتيار الكليين عند مأخذي الدارة أقل من ٩٠ درجة.

تمثل المقاومة R في دارة الطنين المركزة تحويل القدرة الكهربائية إلى قدرة حرارية. تتكون المقاومة R في دارة الطنين المفرودة من مقاومة R_v تمثل الضياع في سلك الهوائي ومقاومة R_s تمثل تحويل القدرة الكهربائية إلى قدرة كهرطيسية تنفصل عن سلك الهوائي منتشرة في الجو المحيط بالهوائي. ويسمى هذا الحقل الكهرطيسي " الحقل البعيد " . في الحياة العملية تكون R_v غالباً قابلة للإهمال بالمقارنة مع R_s إذا لم يكن التردد عالياً وبالتالي لا يوجد ضياع بسبب ظاهرة التأثير القشري.

بالقرب من الهوائي ولمسافة $r < 0.2\ \lambda$ منه يطغى الحقل القريب على الحقل البعيد، أي تطغى المركبتان التخيليتان المختلفتان في زاوية الطور بمقدار ٩٠ درجة على المركبتين الحقيقيتين المتفقتين في زاوية الطور، علماً بأن المركبتين التخيليتين اكبر من المركبتين الحقيقيتين بمقدار جودة الطنين ρ .

على مسافات $r > (3\text{-}4)\ \lambda$ من الهوائي يؤثر الحقل البعيد فقط ، أي تؤثر المركبتان الحقيقيتان المتفقتان في زاوية الطور ويزول تأثير المركبتين التخيليتين. في المنطقة الواقعة بين $r > 0.2\ \lambda$ و $r < (3\text{-}4)\lambda$ يؤثر كلا الحقلين القريب والبعيد بشكل أو بآخر معاً بآن واحد.

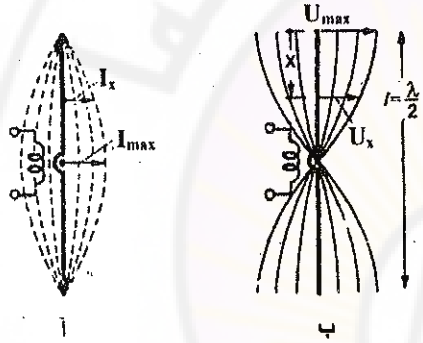
ستتم في الفصل الثاني معالجة الحقل القريب والحقل البعيد بالتفصيل.

١-٤ توزع الجهد وتوزع التيار على هوائي ديبول بطول $\lambda / 2$

يبين الشكل (١-٣) توزع الجهد وتوزع التيار المراقب عملياً على هوائي ديبول محرض بتردد يساوي تردده الذاتي، أي محرض بموجته الأساسية، كما يبين وضعيات هذا التوزع بعلاقة الزمن.

يبين الشكل (أ) أن قيمة التيار الكهربائي في منتصف سلك الديبول هي أكبر ما يمكن،

وتنخفض باتجاه نهايتيه بشكل جيبي تقريباً، وتكون قيمة التيار الكهربائي عند نهـايتي سـلك الهوائي حتماً مساوية الصفر. مقابل ذلك تنشأ انطلاقاً من منتصف الديبول باتجاه نهايته حيث الجهد موجب (أي باتجاه سريان التيار الكهربائي أو تيار النقل) تيارات انزياح تنطلق مـن هذا الطرف للديبول وتصب على الطرف الآخر حيث الجهد سالب سالكة مسـارات خطـوط الحقل الكهربائي. وتزداد قيمة تيار الانزياح بزيادة الاقتراب من نهاية الديبول . ويمكن القول إنّ تيار النقل يكمل طريقه بتيار الانزياح بحيث تصبح " الدارة الكهربائية " مغلقـة. وتجـدر الإشارة هنا إلى أن التيار الكهربائي (تيار النقل) يسري في سلك الهوائي من الطرف حيث الجهد سالب إلى الطرف الآخر حيث الجهد موجب (كما هي الحال ضمن القـوة المحركـة الكهربائية). بينما يسري تيار الانزياح من طرف الهوائي حيث الجهد موجب إلى الطـرف الآخر حيث الجهد سالب (كما هي الحال في حمل القوة المحركة الكهربائية).



الشكل (١-٣) : توزع الجهد والتيار على هوائي ديبول محرض بموجته الأساسية
آ-توزع التيار في لحظات زمنية مختلفة
ب-توزع الجهد في لحظات زمنية مختلفة

يبين الشكل (ب) أن اكبر قيمة للجهد موجـودة بين نهايتي سلك الديبول، ويكون الجهد في وسط الديبول صغيراً جداً، ويمكن اعتبـاره بالتقريـب الأول مساوياً للصفر. يدل توزع الجهد والتيـار على الديبول الذي يحوي عقداً وبطوناً واضـحة إلى أنه تنشأ على سلك الهوائي موجة مسـتقرة، كما هي الحال في ناقل تردد عـالٍ بطـول $\lambda/4$ مفتوح عند نهايته. ويمكن أن نتصور أن الديبول بطول $\lambda/2$ هو ناقل تردد عالٍ بطول $\lambda/4$ غيـر محمل ومفرود تدريجياً (أنظر الشكل ١-١-ب).

ويوجد عند نهاية ناقل التردد العالي المذكور بطن جهد وعقدة تيار ، بينما يوجد عند مدخلـة عقدة جهد وبطن تيار (قارن مع الشكل ١-٧-جـ). إلا أنه بالمقارنة الدقيقة بـين الـديبول وناقل التردد العالي نجد أن هناك اختلافاً بسيطاً بين توزع الجهد والتيار على كـل منهمـا. ويتوزع الجهد والتيار على ناقل التردد العالي المذكور بشكل جيبي نقي، ويكون الحد الأقصى للجهد والحد الأقصى للتيار منزاحين الواحد عن الآخر زمنياً بمقدار ربع دورة. هذا يعني أن ناقل التردد العالي لا ينقل قدرة حقيقية بل قدرة تخيلية فقط. بالمقابل يكون توزع الجهد والتيار على الديبول جيبي الشكل تقريباً، ويكون بذلك الفرق بين الحد الأقصى للجهد والحد الأقصى

للتيار تقريباً ٩٠ درجة. هذا يعني أن الديبول ينقل بالاضافة إلى القدرة التخيلية قدرة حقيقية قيمتها صغيرة بالمقارنة مع القدرة التخيلية، والقدرة الحقيقية هي التي تشع من الديبول في الجو المحيط به.

إذا اهملنا بالتقريب الأول اختلاف توزع الجهد والتيار على الديبول عن الشكل الجيبي النقي يمكننا أن نكتب القيمة الفعالة للجهد وللتيار على المواضع المختلفة لسلك ديبول محرض بموجته الأساسية بالشكل التالي:

$$I_x \approx I_{\max} \sin\frac{\pi}{l}x = I_{\max} \sin\frac{2\pi}{\lambda}x$$

$$U_x \approx U_{\max} \cos\frac{\pi}{l}x = U_{\max} \cos\frac{2\pi}{l}x$$

انطلاقاً من نهاية الديبول يتغير التيار بموجب تابع جيبي ويتغير الجهد بموجب تابع تجيبي، ويكون لكل منهما القيمة I_x و U_x على بعد x من نهاية الديبول (الشكل ١-٣). وينتج الحد قبل المتغير x في التابعين المثلثيين من الفكرة التالية وهي أنه عند تعيير الديبول بطول l على موجته الاساسية تتشكل عليه نصف دورة جيبية أو تجيبية قيمتها 180° أو π . بذلك يمكن تعويض العلاقة بين الزاوية α والمسافة x بالشكل التالي :

$$\frac{\alpha}{\pi} = \frac{x}{l} \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{\pi}{l}x$$

وبما أن $l = \lambda / 2$ تصبح قيمة α :

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}x = \beta \cdot x$$

I_{max} و U_{max} قيمتا التيار والجهد الفعالتان. ويعني الدليل " max " القيمة العظمى في [illegible] الراعي وليس القيمة العظمى بعلاقة الزمن. بشكل مكافئ لتوزع الجهد والتيار على [illegible] تردد عالي مفتوح عند نهايته ترتبط I_{max} و U_{max} في الديبول بالعلاقة :

$$U_{\max} = Z_D \cdot I_{\max} \qquad (١-١)$$

حيث Z_D المقاومة المميزة للديبول. ويسري مفعول هذه العلاقة فقط عندما يكون الديبول مهيأ . تمكن هذه المعادلة من حساب قيمة الجهد عند نهاية الديبول بعلاقة قيمة تيار التغذية في منصف الديبول المحسوبة أو المقاسة . وقانون حساب Z_D للديبول هو نفس قانون حساب المقاومة المميزة لناقل التردد العالي المفتوح عند نهايته.

$$Z_D = \sqrt{\frac{L_{st.}}{C_{st.}}} \qquad (٢-١)$$

وتختلف قيمتا $L_{st.}$ و $C_{st.}$ الساكنتان في الديبول عنها في ناقل التردد العالي بسبب اختلاف وضع سلكي ناقل التردد العالي عن وضع سلكي نصفي الديبول. وتنتج الحسابات النظرية القانونين التاليين لحساب التحريض والسعة الساكنتين في الهوائي الديبول.

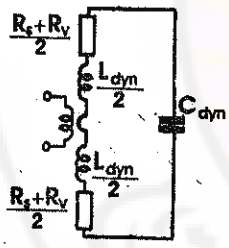
$$L_{st/nH} = 2 \cdot l_{/cm} \cdot \ln 0.575 \frac{l_{/cm}}{d_{/cm}} \qquad (٣-١)$$

$$C_{st/pF} = 1.113 \frac{l_{/cm}}{8 \cdot \ln 0.575 \cdot \frac{l_{/cm}}{d_{/cm}}} \qquad (٤-١)$$

نعوض هاتين المعادلتين في المعادلة (١-٢) فنحصل على العلاقة التالية لحساب المقاومة المميزة للديبول.

$$Z_{D/\Omega} = 120 \cdot \ln 0.575 \frac{l_{/cm}}{d_{/cm}} \qquad (٥-١)$$

١-٥ الدارة المكافئة للهوائي الديبول



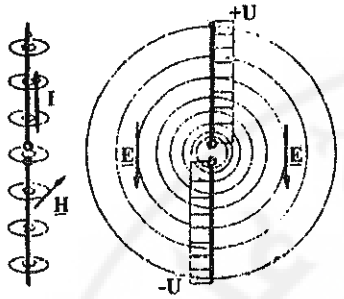
الشكل (١-٤) الدارة المكافئة للديبول

يبين الشكل (١-٤) الدارة المكافئة لديبول طوله نحو $\lambda/2$. لهذه الدارة شكل دارة طنين تسلسلية متوازية تحريضياً وذات مقاومة حقيقية طولانية (تسلسلية). عند تعيير دارة الطنين، أي عند تحريضها على الاهتزاز بتردد مساو لترددها الذاتي، تكون مقاومة مدخلها حقيقية ومساوية لقيمة المقاومة الحقيقية في الدارة المكافئة. تمثل هذه المقاومة أولاً الضياع في سلك الهوائي وثانياً وبشكل رئيسي القدرة التي تشع من الهوائي في أنحاء الجو المحيط به كقدرة مفيدة. وتسمى المقاومة الأولى " مقاومة الضياع R_v " والمقاومة الثانية " المقاومة الإشعاعية R_s". رمز في الدارة المكافئة للسعة وللتحريض بـ $C_{dyn.}$ و $L_{dyn.}$. ولايمكن هنا استعمال القيم الساكنة للسعة والتحريض $C_{st.}$ و $L_{st.}$ المحددتين بالمعادلتين (١-٣) و(١-٤). ويشترط لاستعمالهما وجود توزع جهد وتوزع تيار متساو على امتداد سلك الهوائي كما هو مبين في الشكل (١-٥). وتستعمل المقاومات التخيلية الحركية، أي تستعمل $C_{dyn.}$ و $L_{dyn.}$ ،

لأنها تراعي أن توزع الجهد والتيار على امتداد سلك الهوائي ليس متساوياً بل جيبي الشكل.

ترتبط $C_{st.}$ و$L_{st.}$ بالعلاقتين التاليتين مع $C_{dyn.}$ و L_{dyn} عندما يكون الديبول معيراً على موجته الأساسية:

$$C_{dyn} = \frac{2}{\pi} C_{st} \quad \text{و} \quad L_{dyn} = \frac{2}{\pi} L_{st}$$



الشكل (١-٥) الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي عند توزع الجهد والتيار بشكل متساو

ولا تصلح هاتان المعادلتان لحساب $C_{dyn.}$ و L_{dyn} إذا كان الديبول غير معير، أي لا يهتز على موجته الأساسية، أو أنه يهتز على إحدى أمواجه التوافقية، لأن هاتين المعادلتين تشترطان وجود توزع جيبي على امتداد سلك الهوائي وهذا غير محقق في الحالتين السابقتين.

يتضح من طريقة عمل الديبول كدارة طنين مفرودة أن الديبول يحرض الجو القريب والجو البعيد المحيطين به أشد تحريض كهرطيسي ممكن، وبذلك يكون تأثيره أبعد ما يمكن، فقط عندما يحرض بتردد يساوي تردده الذاتي. إن حساب التردد الذاتي عن طريق تحديد السعة والتحريض الحركيتين وفق العلاقة التالية:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{dyn.} \cdot C_{dyn.}}} \qquad (١-٦)$$

هو معقد جداً. ولتجنب ذلك ننطلق من الفكرة التالية وهي أن طول ديبول محرض بتردده الذاتي كما هو مبين في الشكل (١-٣) يساوي إلى نصف طول الموجة المراد إشعاعها λ ، وهي عادة معطاة . ويرتبط طول الموجة وتردد الاهتزاز عندما يتم الانتشار في وسط ما بالعلاقة :

$$\lambda' = v \cdot T = v \cdot \frac{1}{f} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}} \cdot \frac{1}{f} \qquad (١-٧)$$

حيث λ' طول الموجة في وسط الانتشار، λ طول الموجة في الهواء، v سرعة انتشار الموجة في وسط الانتشار و c سرعة انتشار الموجة في الفضاء الحر، T دور الاهتزاز، f تردد الاهتزاز (انظر المثال١-١).

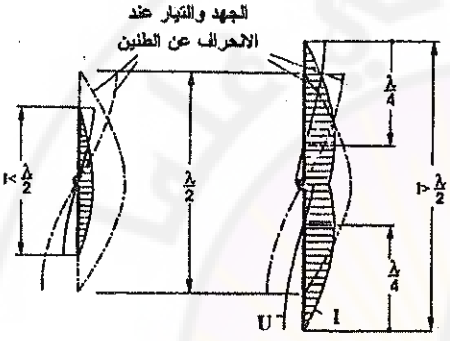
عند انتشار الموجة الكهرطيسية في الهواء يمكن تعويض $\varepsilon_r = 1$ و $\mu_r = 1$ ، بذلك تصبح المعادلة (١-٧):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \rightarrow \quad f = \frac{c}{\lambda} \qquad (٨-١)$$

يحدد التردد الذاتي لديبول معير ويهتز على موجته الأساسية أي $l = \lambda / 2$ (وهي أكبر طول موجة يهتز عليها الديبول) بالمعادلة :

$$f_0 = \frac{c}{2l} \qquad (٩-١)$$

١-٦ توزع الجهد والتيار على ديبول اطول بقليل أو اقصر بقليل من λ/2



الشكل (١-٦): ديبولين غير معيرين

إذا لم يكن الديبول معيراً بطول λ/2 تماماً بل هو أطول أو أقصر بقليل من λ/2 ، كما هو مبين في الشكل (١-٦)، لا تتغير ظروف توزع الجهد والتيار على سلك الديبول من حيث وجود بطن جهد وعقدة تيار عند نهايتيه. على بعد λ/4 من نهايتي سلك الديبول إذا كان الديبول أطول بقليل من λ/2، وفي منتصف الديبول إذا كان الديبول أقصر بقليل من λ/2، تنشأ قيمة دنيا للجهد وقيمة عظمى للتيار. وتتغير في هذه الحالة نسبة الجهد إلى التيار عند نقطتي التغذية، أي تصبح مقاومة المدخل مقاومة ظاهرية $|Z|$. وتحوي المقاومة الظاهرية عند نقطتي التغذية بالإضافة إلى مقاومة الطنين الحقيقة R_S+R_V مقاومة تخيلية X تتعلق قيمتها بمقدار الانحراف عن الطنين. بذلك ينخفض مطالا الجهد والتيار بشكل ملحوظ، كما هي الحال في كل دارة طنين لا تهتز على ترددها الذاتي. إذا كان طول الهوائي أصغر بكثير من نصف طول الموجة ($l << \lambda/2$) تنشأ سعة كبيرة بين نهايتي سلك الهوائي. عندها يقترب توزع الجهد والتيار كثيراً من التوزع المبين في الشكل (١-٥).

١-٧ تعيير وترابط ديبول محرض بموجته الاساسية وديبولات محرضة باحدى أمواجها التوافقية

يكون الديبول معيراً، أي تظهر عند نقطتي تغذيته مقاومة طنين حقيقة بحتة، إذا كان طوله مساوياً إلى λ/2 أو إلى أضعاف λ/2 . يبين الشكل (١-٧) عدة ديبولات محرضة بموجتها

الأساسية أو بإحدى أمواجها التوافقية. وتبين الإشكال آ و ب و جـ إمكانيات مختلفة لتغذية ديبول يهتز على موجته الأساسية. ويجب أن يكون الترابط إما ترابطاً بالتيار ذا مقاومة منخفضة (ترابط تحريضي) أو ترابطاً بالجهد ذا مقاومة عالية (ترابط سعوي)، بحسب ما يحتاج الديبول في موضع تغذيته إلى تيار كبير أو جهد كبير.

الشكل (آ): عند تغذية الديبول تغذية عادية في منتصفه يجب أن يكون الترابط " ترابط بالتيار تحريضياً " . وتنتج طريقة التغذية هذه بطن التيار اللازم بجهد ضئيل.

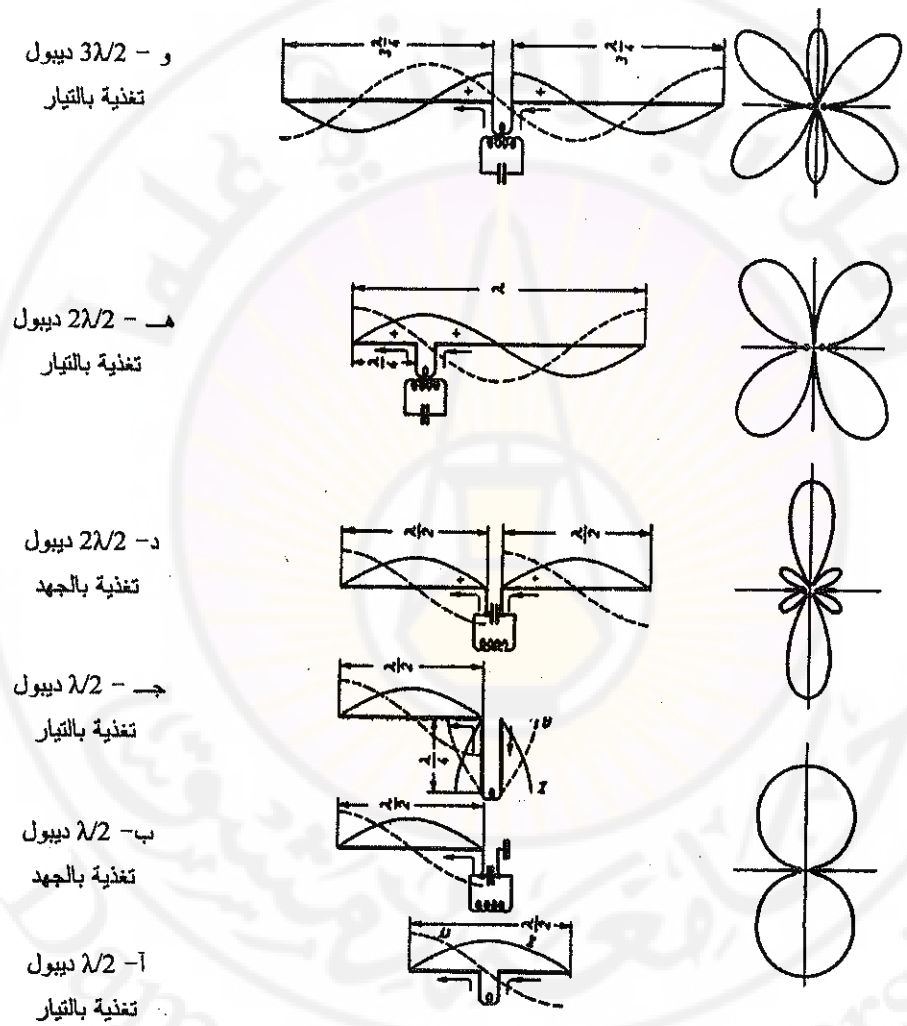
الشكل (ب): يمكن أيضاً تغذية الديبول بطول $\lambda/2$ في إحدى نهايتيه. ويحتاج الديبول في هذه الحالة إلى جهد كبير ولكن إلى تيار ضئيل فقط. لذلك يجب وصله إلى موضع في جهاز الإرسال يوجد فيه جهد كبير. وهذا الموضع هو أعلى دارة طنين جهاز الإرسال التفرعية، ويسمى هذا النوع من الديبولات " Fuchs-Antennas " .

الشكل (جـ): يمكن تغذية الديبول في إحدى نهايتيه من جهاز إرسال ذي مقاومة خرج منخفضة بدلاً من الترابط بالجهد ذي المقاومة العالية. ويتم ذلك برفع مقاومة مخرج جهاز الإرسال إلى قيمة مقاومة مدخل الديبول العالية عند نهايته بوصل ناقل تردد عالٍ بطول $\lambda/4$ مفتوح عند نهايته بين مخرج جهاز الإرسال ومدخل الديبول. ويسمى هذا النوع من الديبولات "Zeppelin-Antennas" أو باختصار "Zepp-Antennas" .

الشكلان (د) و (هـ): يبين الشكلان (د) و (هـ) ديبولين طول كل منهما $l = 2.\lambda / 2$. يغذى الديبول في الشكل (د) في الوسط بينما يغذى الديبول في الشكل (هـ) على بعد $\lambda/4$ من نهايته. ويمكن تحديد توزع الجهد والتيار على مثل هذين الديبولين وتحديد نوع الترابط اللازم بسهولة إذا كان واضحاً أنه يجب أن يوجد حتماً حد أقصى للجهد عند نهاية الديبول، والذي يتحول إلى عقدة جهد على بعد $\lambda/4$ من نهاية الديبول.

الشكل (د): عند تغذية الديبول في المنتصف يجب أن يكون للجهدين عند نهايتي الديبول اشارتان متعاكستان لكي ينشأ بين نقطتي التغذية فرق كمون. بالنسبة لتوزع التيار يجب أن يكون لتياري الهوائي عند موضع التغذية نفس الاتجاه في نصفه اليميني وفي نصفه اليساري، أي لتياري الهوائي نفس الإشارة. وإذا سرى التيار مثلاً من موضع التغذية باتجاه اليسار في النصف اليساري من الديبول فيجب أن يسري التيار في النصف اليميني باتجاه اليسار أيضاً عائداً إلى موضع التغذية. يعمل الديبول بطول $2.\lambda/2$ عند تحريضه في منتصفه بشكل مشابه لناقل التردد العالي بطول $\lambda/2$ المفتوح عند نهايته. وينجم الديبول في هذه الحالة عن فرد ناقل

التردد العالي ليعمل كدارة طنين تفرعية معيرة. ويحتاج مثل هذا الديبول إلـــى تيـــار تغذيـــة صغير فقط إذا كان الضياع فيه ضئيل. ويكون التيار فيه أكبر من تيار التغذية بمقدار جـــودة الطنين، مما ينجم عنه حقول خارجية شديدة. يترابط هذا الديبول سعوياً مع دارة طنين جهـــاز الإرسال. بذلك يوجد الجهد العالي اللازم على نقطتي التغذية لمجرد سحب تيار ضئيل.



الشكل ١–٧ : الترابط وتوزع الجهد والتيار لديبولات تهتز على موجتها الأساسية أو على إحدى أمواجها التوافقية والمخططات الإشعاعية المكافئة في المستوي العمودي

الشكل (هـ): إذا أريد للديبول بطول $\lambda/2 = \lambda$ 2 أن يكون مترابطاً بالتيار يجب أن تكون تغذيته " خارج المنتصف " وعلى بعد $\lambda/4$ من النهاية حيث يكون الديبول قادراً على سحب تيار عالٍ عندما يكون الجهد منخفضاً.

الشكل (و): يبين الشكل (و) توزع الجهد والتيار على ديبول بطول $3\lambda/2$ عند تغذيته في منتصفه. ويجب أن يكون في هذه الحالة الترابط تحريضياً حتى يتشكل في منتصفه بطن تيار وعقدة جهد.

الديبولان المبينان في الشكلين (د) و (هـ) محرضان بموجتهما التوافقية الأولى، أي يعملان بتردد يساوي ضعفي ترددهما الذاتي. الديبول المبين في الشكل (و) محرض بموجته التوافقية الثانية، أي يعمل بتردد يساوي ثلاثة أضعاف تردده الذاتي.

يوجد لدارة الطنين العادية التي تحوي سعة وتحريضاً مركزين، أي واضحين، تردد طنين واحد. ويختلف الأمر في الهوائي وفي ناقل التردد العالي عند معالجتهما كدارة طنين، إذ بسبب التوزع المستمر للسعة $C_{dyn.}$ والتحريض $L_{dyn.}$ على النقاط المختلفة للهوائي يختلف مقدار السعة والتحريض المؤثران على امتداد سلك الهوائي باختلاف توزع الجهد والتيار عليه. ونذكر هنا أن $C_{st.}$ و $L_{st.}$ ثابتة بينما $C_{dyn.}$ و $L_{dyn.}$ متغيرة على امتداد سلك الهوائي. بذلك يمتلك الهوائي العديد من ترددات الطنين، أي العديد من الأمواج الذاتية. ويسري مفعول ما سبق على ناقل التردد العالي.

تختلف الديبولات المبينة في الإشكال (آ) حتى (و) بعضها عن بعض باختلاف قيم مقاومات مدخلها وباختلاف طرق إشعاعها، أي باختلاف مخططاتها الإشعاعية.

وتلخص الأفكار السابقة كما يلي:

- يمكن اعتبار الديبول دارة طنين مفرودة.
- يمتلك الديبول عندما يكون معيراً شدة حقول كهربائية ومغناطيسية عظمى تنقل الجو القريب والبعيد المحيط به إلى حالة تحريض كهربائي ومغناطيسي قصوى.
- يتطابق توزع الجهد والتيار على الديبول عملياً مع توزع الجهد والتيار على ناقل تردد عالٍ مفتوح عند نهايته.

وسنتم في الفصل التالي معالجة كيفية تحرر الأمواج الكهرطيسية من سلك الهوائي وعن إمكانية استقبال جزء من القدرة المشعة على بعد آلاف الكيلومترات من الهوائي.

مسألة ١-١ :

ارسم توزع الجهد وتوزع التيار وحدد نوع الترابط لهوائي ديبول بطول 2λ ، وذلك عنـدما تتم تغذيته في المنتصف أو على بعد $\lambda/4$ ، $\lambda/2$ ، $3\lambda/2$ من نهايته.

Damascus University


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الثاني

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

٢- الإشعاع من الهوائي

٢-١ الهوائي الديبول بطول نصف طول الموجة

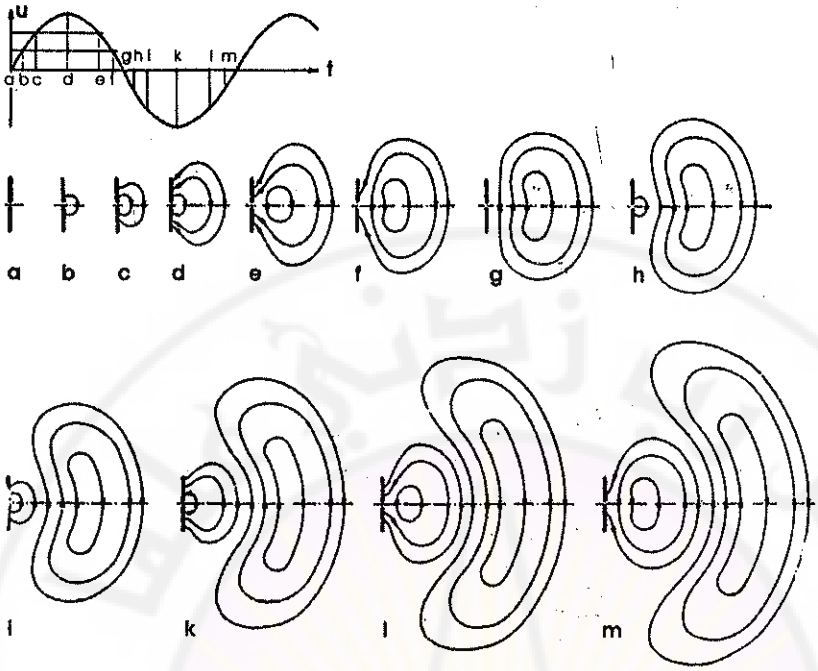
يمكن توضيح نشوء الحقل البعيد بموجب الشكل (٢-١). رسم في أعلى الشكل التغير الزمني لجهد الهوائي، ورسم تحته توزع خطوط الحقل في الجو المحيط بالهوائي في لحظات زمنية متتالية. للسهولة رسمت مراحل الانتشار على الجانب اليميني للديبول الموجود في مستوي الرسم فقط. في الحقيقة توجد مراحل الانتشار هذه على جميع جوانب الديبول طبعاً ومنها الجانب اليساري الموجود في مستوي الرسم. ولم يتم اختيار الفترات الزمنية بين الرسومات الافرادية متساوية القيمة، بل تم اختيارها حيث إن جهد الهوائي يتغير من شكل للآخر بمقدار ثلث القيمة العظمى. وكما هو معلوم يتغير عدد خطوط الحقل الكهربائي النابعة من أحد طرفي الديبول والمنصبة على طرفه الآخر بتغير الجهد، ويتناسب عدد خطوط الحقل الكهربائي طرداً مع الجهد. يكافئ الجهد الأعظمي للديبول $U_{max.}$ في الشكل ثلاثة خطوط حقل، وتكافئ القيمة اللحظية $u = \frac{2}{3}U_{\max}$ خطي حقل، والقيمة اللحظية $u = \frac{1}{3}U_{\max}$ خط حقل واحد.

الشكل (a): لا يوجد جهد على الهوائي وبالتالي لا يوجد حقل.

الشكل (b): يصل الجهد على الديبول إلى $\frac{1}{3}U_{\max}$ وينشأ بالقرب منه حقل ضعيف ممثل بخط حقل واحد.

الشكل (c): يزداد الحقل خطاً آخر عندما يرتفع الجهد إلى القيمة $\frac{2}{3}U_{\max}$. بنفس الوقت وبسبب التأثيرات الخاصة لتيارات الانزياح (ستتم معالجتها لاحقاً، انظر الشكل ٢-٤) تكون حالة الحقل المبينة في الشكل (b) قد انتشرت مسافة معينة بسرعة الضوء. ويتوسع بذلك المجال في الجو المحيط بالهوائي المحرض بالحقل.

الشكل (d): يرتفع جهد الديبول إلى قيمته العظمى، ويصبح عدد خطوط الحقل ثلاثة. وتصبح المسافة الفراغية بين آخر خط حقل وخطي الحقل الأولين أكبر بقليل لأن الفارق الزمني بين الحالة (c) والحالة (d) أكبر بقليل من الفارق الزمني بين الحالة (b) والحالة (c)، وذلك بسبب الصعود الأبطأ للجهد.

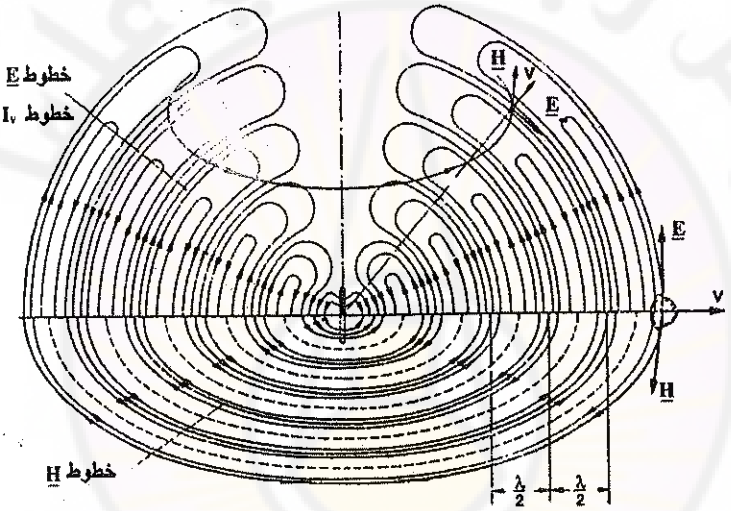


الشكل ٢-١ : نشوء الحقل الكهربائي البعيد نتيجة انغلاق خطوط الحقل على نفسها وانتشارها.
(في الأعلى التغير الزمني لجهود الديبول، وتحته التمثيل البياني لخطوط الحقل في اللحظات الزمنية المختلفة لجهود الديبول)

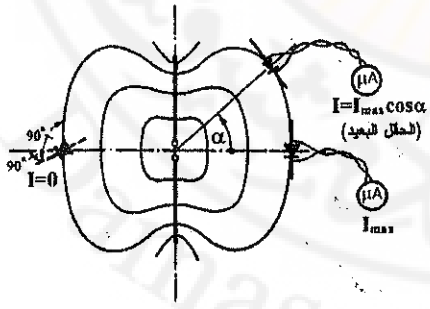
الأشكال (e و f و g): في اللحظات التالية للشكل (d) ينخفض جهد الهوائي وينخفض معه الحقل في الجو القريب المحيط بالهوائي مباشرة ممثلاً بنقصان عدد خطوط الحقل النابعة منه. ويختلف الأمر بالنسبة للحقل البعيد إذ بسبب تأثيرات تيارات الانزياح يحتفظ الحقل بكامل شدته ويتابع انتشاره. وهذا ما يحدث في الأشكال (e و f و g) عندما ينقص عدد خطوط الحقل الخارجة من الديبول من ٣ إلى ٢ إلى ١ ثم إلى الصفر. وتنغلق خطوط الحقل الثلاثة الأولى على نفسها بالتدريج وتنتشر مبتعدة في الجو كدفعة خطوط حقل مستقلة منغلقة على نفسها.

الأشكال (h و i و k): يتشكل في اللحظات الزمنية (h و i و k) بالقرب من الهوائي حقل قوي جديد ولكن باتجاه معاكس. وتتبع خطوط الحقل الناشئة حديثاً في انتشارها الخطوط القديمة. ويتوافق منطقياً اتجاه خطوط الحقل الحديثة مع اتجاه خطوط الحقل في حزمة خطوط الحقل المنغلقة على نفسها.

الأشكال (l و m و n): تنفصل في اللحظات الزمنية (l و m و n) خطوط الحقل الجديدة أيضاً عن الديبول بمرور الزمن وبشكل مكافئ لانخفاض جهد الهوائي. إذا تصورنا الآن شكل خطوط الحقل الكهربائي المنتشرة في المستوي الشاقولي مكملاً بخطوط الحقل المغناطيسي الدائرية الموجودة في المستوي الأفقي والمنتشرة مع خطوط الحقل الكهربائي نحصل على الشكل (٢-٢). ويوضح هذا الشكل الحقل الكهرطيسي البعيد المشع من جانبي الديبول في جو واسع محيط بالهوائي. ويتضح الآن بأن الحقل الكهربائي لديبول متوضع بشكل عمودي تقع في مستويات شاقولية تمر بمحور الديبول. ويوجد الحقل المغناطيسي العمودي على الحقل الكهربائي في مستويات أفقية.



الشكل ٢-٢ : الحقل الكهرطيسي لهوائي ديبول.



الشكل ٢-٣ : قياس الحقل الكهربائي لديبول بواسطة مسبر صغير.

تبين الدراسة الدقيقة ويظهر القياس العملي للحقل الكهربائي بواسطة مسبر بسيط وصغير مكون من قطعة سلك صغيرة ومقوم موصولين على التفرع مع مقياس حساس ذي ملف متحرك أن الحقل الكهربائي في مستوي الانتشار الأفقي المار في منتصف الديبول (حيث $\alpha = 0$) هو أكبر ما يمكن (الشكل ٢-٣) .

وينقص الحقل الكهربائي بازدياد الزاوية α بموجب تابع تجيبي، ويصل إلى قيمة تساوي الصفر عندما تصبح الزاوية $\alpha = 90°$، أي عندما يصبح cosα=0 . وهذا يعني أن الديبول لا يشع قدرة كهرطيسية باتجاهي محوره إلى الأعلى وإلى الأسفل. ويمكن فقط في الحقل القريب تحسس حقل ضعيف باتجاهي محور الديبول . سبب ذلك هو خطوط الحقل الأفقية الناشئة على الديبول في الحقل القريب كما هو مبين في الشكل (٢-٢). بشكل مكافئ لوضع الحقل الكهربائي يجب أن يكون محور المسبر عند إجراء كل قياس لحقل الديبول الكهربائي منطبقاً على مستوي الديبول، بحيث يمكن قياس أكبر قيمة للحقل. وعندما يكون محور المسبر عمودياً على مستوي الديبول يصبح انحراف المؤشر في كل الحالات مساوياً للصفر . كما يجب أن يكون محور المسبر عمودياً على الخط الواصل بين منتصف الديبول ومنتصف المسبر، وفي حال عدم تحقق ذلك يتم قياس مركبة الحقل الكهربائي الموازية لمحور المسبر فقط.

نوضح فيما يلي كيفية نشوء الحقل البعيد بالإضافة إلى وجود الحقل القريب للهوائي.

الصفة المميزة للحقل الناشئ بين صفيحتي مكثف مشحون بجهد ثابت هي أن هذا الحقل ثابت بمرور الزمن. ولا تحدث تغيرات في جو الحقل بين صفيحتي المكثف، ولا يسري تيار من إحدى الصفيحتين إلى الأخرى. ويسمى الحقل الثابت بمرور الزمن الحقل الساكن (Static أو Stationary).

وتختلف الظروف عندما يكون التردد عالياً، حيث يتدفق بين صفيحتي المكثف باتجاه ثم باتجاه معاكس تيار كبير بشكل ملحوظ يسمى تيار الانزياح (Displacement Current)، وهو استمرار لتيار النقل (Convection Current) الذي يسري في سلكي توصيل المكثف. يحدث نفس الشيء في الديبول عندما يكون الجهد المتناوب بين نهايتيه ذا تردد عال، حيث ينبض بالإضافة إلى تيار النقل في نصفي الديبول المعدنيين وبآن واحد أيضاً تيار انزياح في الجو المحيط بالديبول باتجاه ثم باتجاه معاكس. وتساوي شدة تيار الانزياح شدة تيار النقل. ويسري تيار الانزياح على المسارات التي تسلكها خطوط الحقل الكهربائي. ويزداد تيار الانزياح النابع من أحد طرفي الديبول والمنصب على الطرف الآخر بقدر ما ينقص تيار النقل باتجاه نهايتي الديبول. يزداد بموجب القانون $I = \omega \cdot C \cdot U$ ($\frac{U}{I} = \frac{1}{\omega \cdot C}$) تيار الانزياح بازدياد التردد المستعمل وبازدياد الجهد والسعة بين طرفي الديبول.

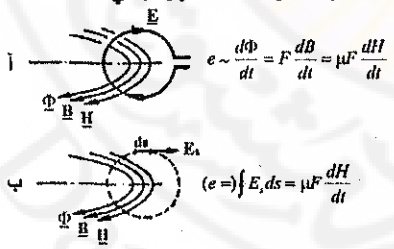
بموجب الفكرة العبقرية لماكسويل يحيط تيار الانزياح، المتدفق بين نهايتي الديبول باتجاه ثم

باتجاه معاكس نفسه بحقل مغناطيسي أيضاً، كما يحيط تيار النقل الساري في الديبول نفسه بحقل مغناطيسي (أنظر المعادلة ١-١٦-آ). ويتراكم كلا الحقلين المغناطيسيين، الحقل المغناطيسي الناجم مباشرة عن تيار النقل الذي يتناقص بعلاقة $1/r^2$، والحقل المغناطيسي الناجم مباشرة عن تيارات الانزياح الذي يكبر كثيراً بازدياد التردد. ويوضح ذلك الشكل (٢-٤-آ) للنقطة A الموجودة بالقرب من جهاز الإرسال. في النقطة C البعيدة عن جهاز الإرسال (الشكل٢-٤-ب) يؤثر تيار الانزياح المحلي i_v فقط، حيث يكون الحقل الناجم عن تيار الديبول مباشرة قد انخفض قبل الوصول إلى النقطة C بكثير إلى قيمة لا يمكن تحسسها.إن نشوء الحقول المغناطيسية بتأثير تيارات الانزياح المشار إليه أعلاه لا يوضح كل العلاقات المتبادلة بين الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي. إذ بالإضافة إلى ما سبق يعمل الحقل المغناطيسي الدائري الشكل والناجم عن تيار الانزياح والمحيط بالنقطة A وبالنقطة C ، على توليد حقل كهربائي متناوب جديد في جواره. ويتراكم بالقرب من جهاز الإرسال هذا الحقل الكهربائي مع الحقل الكهربائي القريب الناجم مباشرة عن جهد الديبول، والمتناقص بعلاقة $1/r^3$. ويبقى في الحقل البعيد هذا الحقل الكهربائي وحده حيث يكون الحقل الكهربائي المباشر قد زال قبل ذلك بكثير. ولا يشترط لتوليد حقل كهربائي، أي لتوليد جهد حقل، وجود حلقة من سلك معدني كما هو مبين في الشكل (٢-٤-آ).



الشكل ٢-٤ : لتوضيح مشاركة تيار الانزياح في تشكل وانتشار الحقل الكهرطيسي.

ويولد كل حقل مغناطيسي متغير حوله أيضاً، وبدون وجود سلك معدني، جهوداً تسمى جهود الانزياح أو الجهود الدوارة كما هو مبين في الشكل (٢-٥-ب)، (أنظر المعادلة ١-١٧-آ). ويوجد مع جهود الانزياح تيارات انزياح جديدة تسري على مسارات دائرية. وتحيط تيارات الانزياح هذه نفسها أيضاً بحقول مغناطيسية جديدة، كما هو مبين بالشكل (٢-٤-ب) لحالة



الشكل ٢-٥ : آ- توليد قوة محركة كهربائية e (EMF) في حلقة سلك معدني.

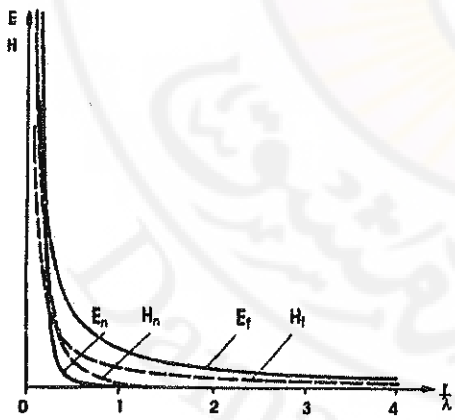
ب- توليد جهد إنزياح أو جهد دائري $\oint E_s \cdot ds$ في حقل مغناطيسي متناوب.

الانتشار في الاتجاه الأفقي.

وبما أن نشوء كل حقل يحتاج إلى زمن ما (ولو كان صغيراً جداً) لا توجد كل الحقول المشار إليها أعلاه بآن واحد، بل يتبع أحدها الآخر في نشوئه بعد زمن يكافئ ربع دورة اهتزاز. وينتج كما هو معروف اشتقاق حقل متغير بموجب تابع جيبي بالنسبة للزمن انزياح في زاوية الطور قدره ٩٠ درجة، أي ربع دورة اهتزاز.

إذا انتبهنا إلى أن النقطة المعالجة C والمبينة في الشكل (٢-٤-ب) ليست مركز التحريض الوحيد لحقول كهربائية ومغناطيسية جديدة، بل إن ما حدث في النقطة C يحدث في كل موضع من مواضع الجو. وإذا فكرنا بناء على ذلك بمظهر وشكل غلاف خطوط الحقل التي يخص بعضها البعض الآخر نتوصل أيضاً بهذه الطريقة إلى شكل الحقل المغناطيسي البعيد المبين في الشكل (٢-٢). ويتبين لنا أيضاً أن الحقل البعيد لديبول ينتج من الحقول التي تجدد نفسها باستمرار نتيجة التأثير المتبادل بين تيارات وجهود الانزياح والحقول المغناطيسية.

تنتج الحقول على مسافة كبيرة من الديبول موجة كروية الشكل مركزها الديبول كمنبع نقطي. وبما أن سطح الكرة يساوي $4\pi.r^2$ ، ينقص تيار القدرة وبالتالي كثافة تيار القدرة S (تيار القدرة خلال وحدة السطح) بعلاقة $\frac{1}{r^2}$ $\left(S = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}\right)$. ونظراً لأن كثافة تيار القدرة تتناسب مع مربع شدة الحقل، أي $S \sim E_{eff}^2 \sim H_{eff}^2$ ، يتبين أن E و H في الحقل البعيد ينقصان بعلاقة $\frac{1}{r}$ (أنظر المقطع ١-٢).



الشكل ٢-٦ : علاقة مركبتي الحقل القريب ومركبتي الحقل البعيد لحقل الديبول الكهرطيسي بالمسافة.

ونذكر هنا إلى أنه يمكن اعتبار الأمواج الكروية على مسافة كبيرة جداً من المنبع أمواج مستوية عمودية على اتجاه الانتشار (أنظر المقطع ١-٣).يوضح الشكل (٢-٦) علاقة شدة كل من مركبتي الحقل القريب ومركبتي الحقل البعيد بالمسافة، مع الإشارة إلى أن هذه العلاقة ناجمة عن المعالجة الرياضية فقط. ويمكن تلخيص ما سبق كما يلي:

- تطغى على مسافات $r < 0.2\,\lambda$ من

الهوائي وبشكل واضح مركبتا الحقل القريب على مركبتي الحقل البعيد

-توجد على مسافات $r > (3-4)\lambda$ مركبتا الحقل البعيد فقط.

- يؤثر في المنطقة الواقعة بين $r > 0.2\lambda$ و $r < (3-4)\lambda$ كلا الحقلين القريب والبعيد بشكل أو بآخر بآن واحد.

تعتبر $r = \lambda$ المنطقة الانتقالية بين الحقل القريب والحقل البعيد.

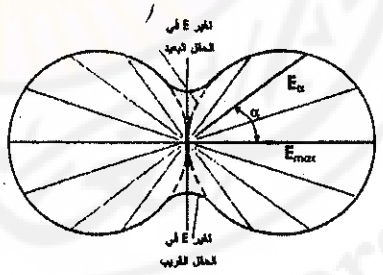
- في الحقل القريب تتناقص مركبة الحقل المغناطيسي H_n بعلاقة $1/r^2$، وتتناقص مركبة الحقل الكهربائي E_n بعلاقة $1/r^3$.

-في الحقل البعيد تتناقص كلا مركبتي الحقل المغناطيسي والحقل الكهربائي H_f وE_f بعلاقة $1/r$.

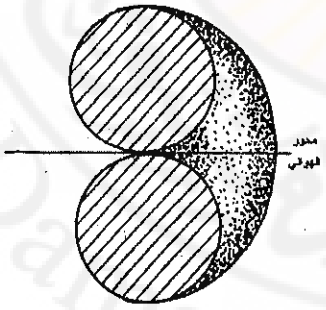
- في الحقل القريب تزاح E_n عن H_n زمنياً بمقدار ربع دورة اهتزاز، وهذا يعني أن الحقل القريب يحوي قدرة تخيلية.

- في الحقل البعيد تمتلك E_f و H_f نفس زاوية الطور، وهذا يعني أن الحقل البعيد يحوي قدرة حقيقية فقط.

يبين الشكل (٢-٧) المخطط الإشعاعي لهوائي ديبول عمودي بطول نصف الموجة (متوضع بشكل عمودي أو شاقولي) في الحقل القريب والحقل البعيد. المخطط الإشعاعي في الحقل القريب هو الشكل المرسوم بخط مستمر، والمخطط الإشعاعي في الحقل البعيد هو الشكل المرسوم بخط متقطع مكملاً بخط مستمر. سبب عدم وصول قيم الحقل الكهربائي في المخطط الإشعاعي في الحقل القريب إلى القيمة صفر عند محور الديبول هو أن خطوط الحقل الكهربائي في الحقل القريب يجب أن تصب بشكل عمودي على سلك الهوائي (الشكل ٢-٧).



الشكل ٢-٧ : المخطط الإشعاعي لديبول عمودي بطول $\lambda / 2$ في الحقل القريب والحقل البعيد.

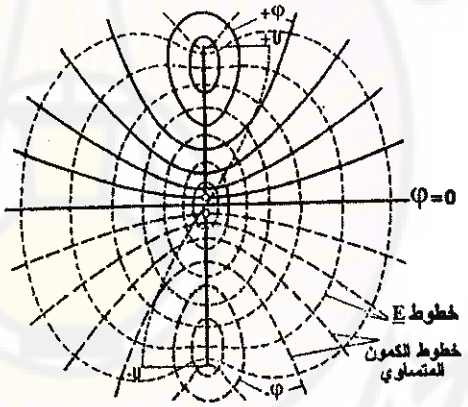


الشكل ٢-٨ : المخطط الإشعاعي لديبول أفقي بطول $\lambda / 2$ مجسم فراغياً ومقطوعاً في المنتصف.

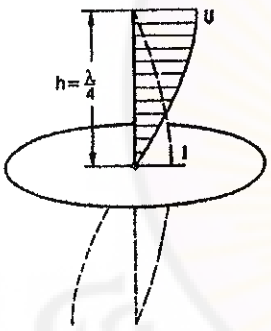
ولا يمكن لخطوط الحقل الكهربائي أن تصب بشكل مائل على سلك الهوائي لأن ذلك يعني أنّ هناك مركبة حقل كهربائي ضمن سلك الهوائي المعدني، وهذا غير وارد فيزيائياً.
زيادة في الإيضاح رسم في الشكل (٢-٨) المخطط الإشعاعي لهوائي ديبول أفقي بطول نصف الموجة في الحقل البعيد مجسم فراغياً ومقطوعاً بمستو يمر في سلك الديبول، أي مقطوعاً بمستوي الرسم.

٢-٢ الهوائي المؤرض بطول ربع الموجة

يبين الشكل (١-٣) توزع الجهد والتيار على ديبول بطول λ/2 ، حيث يوجد في منتصفه دائماً بطن تيار وعقدة جهد. ويبين الشكل (٢-٩) الخطوط الممثلة لسطوح الكمون المتساوي φ في الجو المحيط بالديبول. من تناظر خطوط الحقل الكهربائي وخطوط الكمون المتساوي على طرفي مستوي يمر في منتصف الديبول عمودياً على محوره، يتبين أن هذا المستوي هو سطح كمون متساو، ويساوي كمونه دائماً الصفر.



الشكل ٢-٩ : خطوط الكمون المتساوي على طرفي ديبول بطول λ / 2 .

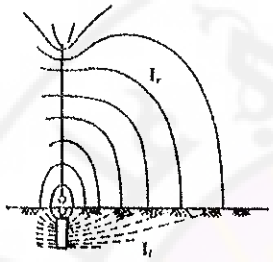


الشكل ٢-١٠ : صفيحة معدنية في سطح الكمون المتساوي φ = 0 .

تصب جميع خطوط الحقل الكهربائي على سطوح الكمون المتساوي دائماً بشكل عمودي. ذلك يعني أن شدة الحقل الكهربائي لا تمتلك في هذه السطوح مركبة أفقية، بما فيها السطح المستوي المار في منتصف الديبول حيث φ = 0 . لذلك يمكن وضع صفيحة معدنية مستوية مساحتها كبيرة في منتصف الديبول بدون أن يتأثر توزع الجهد والتيار على الديبول، وبدون

أن تتأثر مسارات حقل الديبول. كما يمكن إلغاء كل النصف السفلي للديبول دون أن يحدث أي تشويه للحقل فوق الصفيحة. ويبقى توزع الجهد على نصف الديبول العلوي (الشكل ٢ -١٠) وكذلك الحقل في نصف المجال الجوي العلوي دون أي تغيير.

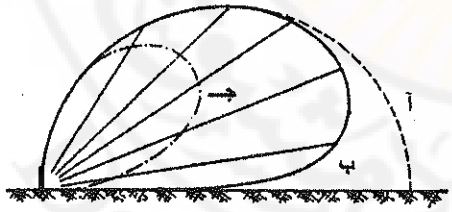
تستعمل هذه الإمكانية بشكل واسع في تقنية الإرسال حيث يعتبر سطح الأرض بالتقريب طبقة ذات ناقلية جيدة بسبب وجود المياه الجوفية الناقلة تحته. بذلك يتم التوصل إلى الهوائي المؤرض أو الهوائي العمودي، ويسمى أيضاً في بعض المراجع هوائي " Marconi " أو هوائي "نصف ديبول".



الشكل ٢-١١ : لتوضيح تحول تيارات الانزياح إلى تيارات نقل.

تتحول تيارات الانزياح i_v الموجودة في الجو المحيط بالهوائي العمودي عند ورودها إلى سطح الأرض مرة أخرى إلى تيارات نقل i_l . وتسري تيارات النقل في الطبقات القريبة من سطح الأرض عائدة إلى نقطة أسفل الهوائي (الشكل ٢-١١).

ولو كان سطح الأرض ناقلاً مثالياً لأصبحت شدة الحقل الكهربائي فيه مساوية للصفر. إلا أنّ لسطح الأرض في الواقع مقاومات تختلف باختلاف الخواص الكهربائية لنوع الأرض الموجود فوقها الهوائي، وهي في كثير من الحالات مقاومات كبيرة. لذلك تسبب التيارات المارة في الأرض هبوطات جهد وضياعات تيار حرارية في الأرض. لهذا السبب تنصب خطوط الحقل الكهربائي الموجودة في الجو المحيط بالهوائي بشكل مائل على سطح الأرض وليس بشكل عمودي. ويسبب ذلك إضعاف وتشويه الحقل الخارجي بالقرب من الهوائي.



الشكل٢-١٢ : علاقة شكل المخطط الإشعاعي العمودي لهوائي عمودي بطول λ/4 بناقلية الأرض.
آ - أرض ذات ناقلية مثالية
ب- أرض ذات ناقلية عادية (أرض رطبة).
جـ- أرض ذات ناقلية سيئة (أرض جافة).

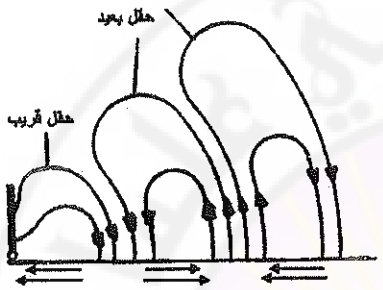
يوضح الشكل (٢-١٢) تغير شكل المخطط الإشعاعي العمودي بسبب هذه الظاهرة. ويتحول منحني نصف الدائرة المثالي الذي تقع قيمه العظمى في المستوي الأفقي المار في أسفل الهوائي إلى لفة مائلة بالنسبة لسطح الأرض.

لتقليل الضياع في الأرض قدر الإمكان تحاط نقطة أسفل الهوائي العمودي بشبكة

معدنية يساوي نصف قطرها ارتفاع الهوائي

تقريباً، تطمر هذه الشبكة تحت الهوائي قريباً من المياه الجوفية. تتكون هذه الشبكة بالدرجة الأولى من أسلاك معدنية مصقولة وممددة بشكل ناظمي. كما توضع في الأرض عند نقطة أسفل الهوائي مباشرة صفيحة معدنية سميكة ومصمتة أو أسطوانة معدنية مصمتة كناقل عودة للتيارات العائدة إلى موضع تغذية الهوائي، نظراً لأن التيارات العائدة تتجمع في هذه النقطة مشكلة كثافة تيار عالية.

وبشكل مشابه للطريقة التي تكمل فيها تيارات الانزياح في الحقل القريب نفسها تيارات نقل تسري في الأرض عائدة إلى الهوائي، يجب أن تكمل تيارات الانزياح في الحقل البعيد نفسها بتيارات نقل تسري في سطح الأرض كما هو مبين في الشكل (٢-١٣).



الشكل ٢-١٣ : التيارات الأرضية في الحقل القريب والحقل البعيد.

ترتفع مقاومات الأرض في هذه الحالة تخامد الأمواج الكهرطيسية المنتشرة على سطح الأرض. وكما ورد سابقاً يزداد التخامد بنقصان طول الموجة المنتشرة. لهذا السبب تنتشر الأمواج الطويلة على امتداد سطح الأرض بشكل أفضل من الأمواج القصيرة.

الفصل الثالث

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

٣- أهم القيم المميزة للهوائي

تتم فيما يلي معالجة أهم القيم المميزة للهوائي أو لنظام هوائي وقوانين حسابها دون اشتقاق رياضي كامل. هذه القوانين للأسف سارية المفعول ضمن شروط محددة. وعلى سبيل المثال يقدم بعض هذه القوانين الدقة المطلوبة عندما يكون ارتفاع الهوائي صغيراً بالمقارنة مع طول الموجة، بينما يقدم البعض الآخر الدقة المطلوبة فقط عندما يحرض الهوائي بموجته الأساسية. لذلك يجب قبل استعمال أي قانون التأكد من أنه ساري المفعول للحالة المعنية.

٣-١ الاستطاعة المشعة من الهوائي

تم في الجزء الأول من الكتاب وضع القوانين اللازمة لحساب شدة الحقل في منطقة الاستقبال الناجمة عن إشعاع استطاعة ما من هوائي الإرسال. عند طرف الإرسال يهمنا بشكل خاص حساب قيمة الاستطاعة الكلية التي يشعها هوائي الإرسال. وتمثل هذه الاستطاعة في الواقع الاستطاعة المفيدة لجهاز الإرسال. ويمكن منها حساب قيمة الجزء الحقيقي لممانعة مدخل الهوائي.

تحدد الاستطاعة المشعة من كمية القدرة التي تعطى إلى الحقل البعيد كل ثانية. بموجب المعادلة (١-٤) تتدفق استطاعة dP خلال سطح صغير dF عمودي على اتجاه الانتشار:

$$dP = S \cdot dF \qquad \text{حيث} \qquad S = \frac{E_{eff}^2}{120\pi} = \frac{E_{eff}^2}{Z_0}$$

ونحصل على الاستطاعة الكلية المشعة من جهاز الإرسال بإجراء التكامل لهذه المعادلة على قشرة كروية (سطح كروي) حول المشع.

$$P = \int dP = \int S \cdot dF = \frac{1}{Z_0} \int E_{eff}^2 \cdot dF$$

عند إجراء التكامل لهذه المعادلة يجب مراعاة أن كثافة الاستطاعة المشعة S وشدة الحقل الكهربائي E تتغيران من نقطة إلى أخرى في الجو المحيط بالهوائي.

وتكون نتيجة التكامل لهوائي مؤرض ارتفاعه $h \le \lambda/4$ معادلة القيم العددية التالية:

الاستطاعة المشعة من هوائي عمودي

$$P_S = 1579(\frac{h_{eff}}{\lambda})^2 I^2 \approx 1600(\frac{h_{eff}}{\lambda})^2 I^2 \qquad (١-٣)$$

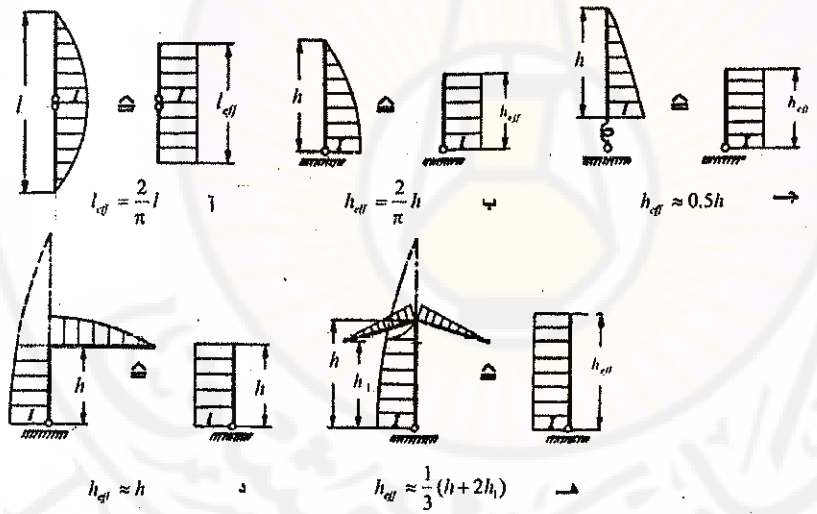
حيث P_S الاستطاعة المشعة بالواط.

I القيمة الفعالة للتيار في موضع التغذية بالأمبير.

h_{eff} الارتفاع الفعال للهوائي وهو أصغر من الارتفاع الهندسي h وله نفس وحدة λ .

سبب استعمال الارتفاع الفعال للهوائي بدل ارتفاعه الهندسي هو أنه اعتبرت قيمة التيار عند اشتقاق قانون الاستطاعة ثابتة على امتداد سلك الهوائي، وتساوي قيمة التيار في موضع التغذية (الشكل ١-٥). كذلك اعتبر أن كل جزء من سلك الهوائي اشترك بالإشعاع بشكل متساو. وقد تم ذلك لتسهيل العمل الحسابي بشكل ملموس. في الواقع يختلف الأمر عما سبق لأن توزع التيار على سلك الهوائي هو جيبي الشكل (الشكل ١-٣). بذلك تقدم الأجزاء العلوية من سلك الهوائي، التي يسري فيها تيار صغير، اسهاماً أقل في تشكيل الحقل الكلي من الإسهام الذي تقدمه الأجزاء السفلية لسلك الهوائي، والذي يسري فيها تيار كبير.

يمكن بمساعدة طريقة حساب القيمة المتوسطة وبسهولة تحويل هوائي ارتفاعه الهندسي h وتوزع التيار عليه غير متساو إلى هوائي توزع التيار عليه متساو ولكن ارتفاعه h_{eff} أصغر من ارتفاعه الهندسي.



الشكل ٣-١ : الارتفاع الفعال لعدد من الهوائيات شائعة الاستعمال

آ- ديبول درجة نحالته عالية ب- هوائي عمودي درجة نحالته عالية

جـ- هوائي عمودي مع ملف زيادة طول د- هوائي L هـ- هوائي عمودي مع مظلة

رسمت في الشكل (٣-١) بعض الهوائيات شائعة الاستعمال. يبين الشكل اليساري لكل هوائي توزع التيار الحقيقي عليه وارتفاعه الهندسي h ، بينما يبين الشكل اليميني الهوائي المكافئ،

حيث توزع التيار عليه متساو، وارتفاعه الفعال h_{eff} .

يمكن استعمال العامل $2/\pi$ في حساب الارتفاع الفعال للهوائي العمودي وللديبول فقط عندما يكونان معيرين. عند تشغيلهما في حالة عدم تعيير لا يكون توزع التيار عليهما جيبي الشكل، وتختلف بذلك قيمة الارتفاع الفعال لكل منهما عن القيمة المدرجة في الشكل (٣-١). ويكون الارتفاع الفعال h_{eff} للهوائيات العمودية المنخفضة (القصيرة جداً) فقط بحدود $0.5h$ (الشكل ٣-١-جـ).

تساوي الاستطاعة المشعة من هوائي ديبول ضعف الاستطاعة المشعة من هوائي عمودي مؤرض، نظراً لأن الديبول يشع قدرة من كلا نصفيه. نعوض في المعادلة (٣-١) الطول الفعال l_{eff} بدلاً من الارتفاع الفعال h_{eff} حيث $h_{eff}=l_{eff}/2$، ونضرب المعادلة بالعدد ٢، فنحصل على معادلة القيم العددية التالية لحساب الاستطاعة المشعة من ديبول طوله $l\leq\lambda/2$.

$$P_S = 2\cdot 1600(\frac{l_{eff}/2}{\lambda})I^2$$

أو

الاستطاعة المشعة من ديبول

$$P_S = 790(\frac{l_{eff}}{\lambda})I^2 \approx 800(\frac{l_{eff}}{\lambda})I^2 \qquad (٣-٢)$$

حيث P_S بالواط ، I بالامبير ، l_{eff} و λ بنفس وحدة القياس.

٣-٢ المقاومة الإشعاعية للهوائي

للمعادلتين (٣-١) و (٣-٢) شكل قانون الاستطاعة المعروف $P = R\,.\,I^2$. لذلك يجب أن يكون للحد الموجود قبل I^2 في المعادلتين المذكورتين بعد المقاومة. لهذا السبب يعتبر هذا الحد مقاومة تسمى " المقاومة الإشعاعية " للهوائي ويرمز لها بـــ R_S . ويمكن تصور هذه المقاومة موجودة في أسفل الهوائي العمودي ويمر فيها تيار الهوائي I ، وتستهلك استطاعة مساوية إلى الاستطاعة المشعة من الهوائي. من المعادلتين (٣-١) و (٣-٢) نحصل على معادلتي القيم العددية التاليتين لحساب المقاومة الإشعاعية R_S .

هوائي عمودي

$$R_S = 1579(\frac{h_{eff}}{\lambda})^2 \approx 1600(\frac{h_{eff}}{\lambda})^2 \qquad (٣-٣)$$

هوائي ديبول

$$R_S = 790(\frac{l_{eff}}{\lambda})^2 \approx 800(\frac{l_{eff}}{\lambda})^2 \qquad (٣-٤)$$

حيث لـ h_{eff} و l_{eff} و λ نفس وحدة القياس ، و R_S بالأوم.

- المقاومة الإشعاعية لهوائي عمودي معير بطول $h = \lambda/4$ (الشكل ٣-١-ب).

نعوض في المعادلة (٣-١)

$$h_{eff} = \frac{2}{\pi} h = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2\pi}$$

فنحصل على القيمة $R_S \approx 40\,\Omega$.

- المقاومة الإشعاعية لهوائي ديبول معير بطول $l = \lambda/2$ (الشكل ٣-١-آ).

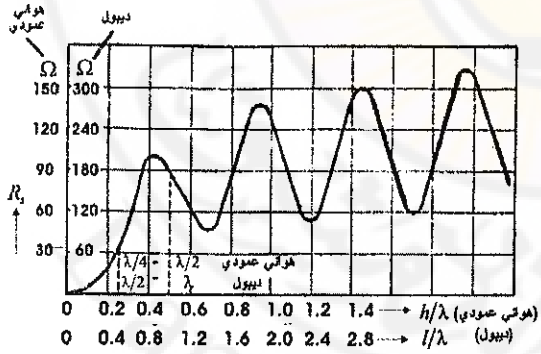
نعوض في المعادلة (٣-٢)

$$l_{eff} = \frac{2}{\pi} l = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{\pi}$$

فنحصل على القيمة $R_S \approx 80\Omega$.

تسمى المعادلتان (٣-١) و (٣-٢) معادلتي " Rüdenberg " . ولاتعكس هاتان المعادلتان الظروف الحقيقية على الهوائي العمودي والديبول تماماً، نظراً لأن " Rüdenberg " افترض عند اشتقاقهما بأنّ المخطط الإشعاعي دائري بشكل مثالي وهذا لا يطابق الواقع بدقة. أنتجت الحسابات النظرية الدقيقة أن المقاومة الإشعاعية للهوائي العمودي هي ٣٦,٦ أوم بدلاً من ٤٠ أوم وللديبول هي ٧٣,٢ أوم بدلاً من ٨٠ أوم. وقد تبين ما يلي:

تتطابق المعادلتان (٣-١) و (٣-٢) مع الحسابات النظرية الدقيقة بشكل أفضل كلما صغر طول الهوائي.



الشكل (٣-٢): المقاومة الإشعاعية لديبول ولهوائي عمودي

- لا يسري مفعول هاتين المعادلتين حتى بشكل تقريبي على الديبولات التي طولها أكبر من $\lambda/2$ وعلى الهوائيات العمودية التي ارتفاعها أكبر من $\lambda/4$ ، نظراً لأن توزع التيار والمخطط الإشعاعي لهذه الهوائيات يختلفان بشكل جذري عما هو مبين في الشكل (١-٧-آ).

ويفضل استخدام المنحني البياني المرسوم في الشكل (٣-٢) في تحديد المقاومة الإشعاعية

لمثل هذه الهوائيات، وقد تم وضعه من قبل " Siegel " بناء على حسابات نظرية دقيقة. افترض حتى الآن أن سلك الهوائي العمودي وسلكي الديبول رفيعة بالنسبة لطول الهوائي. وتنخفض قيمة المقاومة الإشعاعية كثيراً عن القيم المشار إليها فيما سبق عندما يكون سلك الهوائي ثخيناً بالنسبة لطول الموجة. تسمى نسبة طول الهوائي إلى قطره " درجة نحالة الهوائي " . يعتبر الهوائي العمودي نحيل إذا كانت هذه النسبة ١٠٠. ويعتبر الديبول نحيلاً إذا كانت هذه النسبة ٢٠٠. إذا انخفضت نسبة طول هوائي ديبول معير إلى قطر سلكه من ٢٠٠ إلى ٢٠ تنخفض مقاومته الإشعاعية من ٧٣,٢ أوم إلى نحو ٦٠ أوم.

٣-٣ ممانعة مدخل الهوائي

من المهم جداً معرفة ممانعة مدخل الهوائي وعلاقتها بمقاييس الهوائي، وذلك للتمكن من موافقة الهوائي مع جهاز الإرسال أو مع ناقل التغذية الواصل بين جهاز الإرسال والهوائي بشكل صحيح. ممانعة مدخل الهوائي هي في الحالات العامة مقاومة عقدية ويرمز لها بالحرف $\underline{Z}_A$.

$$\underline{Z}_A = R_A + jX_A \qquad (٣-٥)$$

وتصبح ممانعة مدخل الهوائي مقاومة حقيقية فقط عندما يكون الهوائي معيراً.

١- المركبة الحقيقية لممانعة مدخل الهوائي

تتكون المركبة الحقيقية R_A من المقاومة الإشعاعية R_S ومقاومة ضياع الهوائي R_V . وكما يتبين من الشكل (٣-٢) تتعلق R_S بشدة بالنسبة h/λ و l/λ .

ينجم الضياع في الهوائي الديبول بالدرجة الأولى عن المقاومة الطولانية لسلك الهوائي التي لا يمكن اعتبارها صغيرة وقابلة للإهمال في الترددات العالية بسبب ظاهرة التأثير القشري. يوجد في الهوائي العمودي المؤرض والمتوضع شاقولياً بالإضافة إلى الضياع المشار إليه بسبب التأثير القشري، ضياع آخر ناجم من تيار يتسرب على سطوح عوازل كابلات تثبيت الهوائي شاقولياً، وكذلك ضياع في الأرض ناجم عن سريان تيارات النقل في الأرض والمكملة لتيارات الانزياح.

تمثل الضياعات السابقة تحول جزء من قدرة الهوائي الكهربائية إلى قدرة حرارية. وقد تم التعبير عنها في الدارتين المكافئتين للديبول وللهوائي العمودي بمقاومة حقيقية رمز لها بـ R_V. ويمكن افتراض أنها موجودة في أسفل الهوائي ويسري فيها تيار تغذية I . وبشكل

مشابه لعلاقة الاستطاعة المشعة بمربع تيار التغذية $P_S = R_S I^2$ ، يمكن التعبير عن استطاعة الضياعات الحرارية بالعلاقة $P_V = R_V I^2$.

مردود الهوائي : تسمى نسبة القدرة المفيدة المشعة من الهوائي إلى القدرة الحقيقية الكلية المغذاة في الهوائي بمردود الهوائي. من العلاقة

$$\eta = \frac{P_S}{P_S + P_V} = \frac{R_S I^2}{R_S I^2 + R_V I^2}$$

نحصل على العلاقة التالية لحساب مردود الهوائي.

$$\eta = \frac{R_S}{R_S + R_V} \qquad (٦-٣)$$

تمتلك هوائيات الأمواج الطويلة مقاومة إشعاعية صغيرة نسبياً، حيث و لأسباب إنشائية تقنية لا يمكن جعل ارتفاعاتها عالية بما فيه الكفاية. وتكون في هذه الهوائيات نسبة الارتفاع الفعال للهوائي إلى طول الموجة $\frac{h_{eff}}{\lambda} \le 0.25$. لذلك تحاط قاعدة هذه الهوائيات بشبكة معدنية يساوي نصف قطرها ارتفاع الهوائي تطمر تحت سطح الأرض لجعل مقاومة الأرض التي تشكل المنبع الرئيسي للضياع صغيرة قدر الإمكان (انظر المقطع ٢-٢).

على سبيل المثال إذا أشع هوائي عمودي ارتفاعه $h = 60\ m$ موجة طولها $\lambda = 500\ m$ ، تكون مقاومته الإشعاعية.

$$R_S = 1579(\frac{h_{eff}}{\lambda})^2 = 1579(\frac{2/\pi \cdot 60}{500})^2 = 9.5\Omega$$

بينما تكون المقاومة الإشعاعية لهوائي عمودي معير $R_S = 36.6\ \Omega$.

وإذا قدرت القيمة الكلية لمقاومات الضياع $R_V = 3\ \Omega$ ، يكون مردود هذا الهوائي.

$$\eta = \frac{9.5}{9.5+3} = 0.76 \triangleq 76\%$$

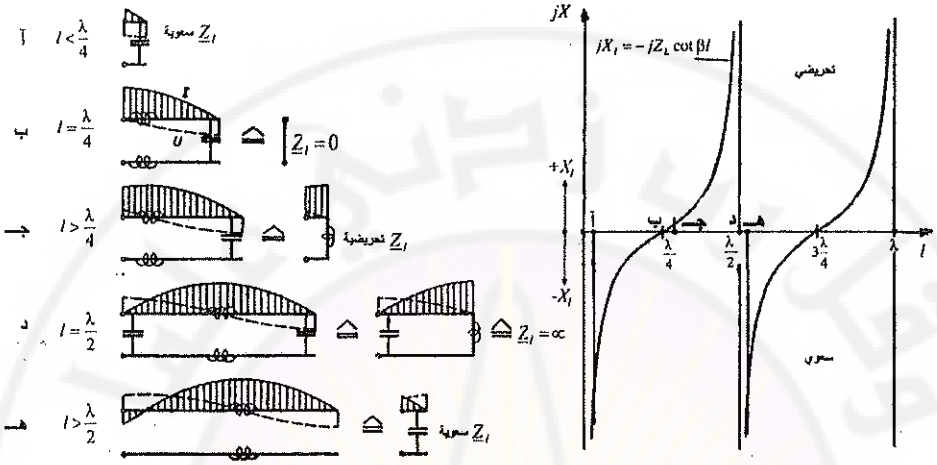
ويكون مردود هذا الهوائي لو كان معيراً.

$$\eta = \frac{36.6}{36.6+3} = 0.924 \triangleq 92.4\%$$

ويعرف العديد من المراجع مردود الهوائي بنسبة الاستطاعة الحقيقية المشعة من الهوائي P_S إلى الاستطاعة الكلية عند مأخذي الهوائي P_A وهي في حالة الهوائي غير المعير استطاعة ظاهرية تحوي مركبة حقيقية وأخرى تخيلية (انظر المثال ٤-١).

٢- المركبة التخيلية لممانعة مدخل الهوائي

يمتلك الهوائي بالإضافة إلى المقاومة الحقيقية R_A مقاومة تخيلية X_A تتعلق قيمتها بشدة بطول الهوائي. سبب هذه المقاومة التخيلية هو التوزع الجيبي (بالتقريب الأول) للجهد والتيار على امتداد سلك الهوائي.



الشكل ٣-٣ : علاقة ممانعة مدخل ناقل تردد عالي عديم الضياع وغير محمل (مفتوح عند نهايته)

آ - ناقل قصير يؤثر كسعة . تصغر قيمة السعة كلما اقترب طول الناقل من $\lambda/4$.

ب- طول الناقل $\lambda/4$ حيث يحدث الطنين الأول. يوجد عند مدخله عقدة جهد وبطن تيار حاصل قسمتهما يساوي الصفر، وهذا يكفئ دارة طنين تسلسلية تهتز في حالة طنين.

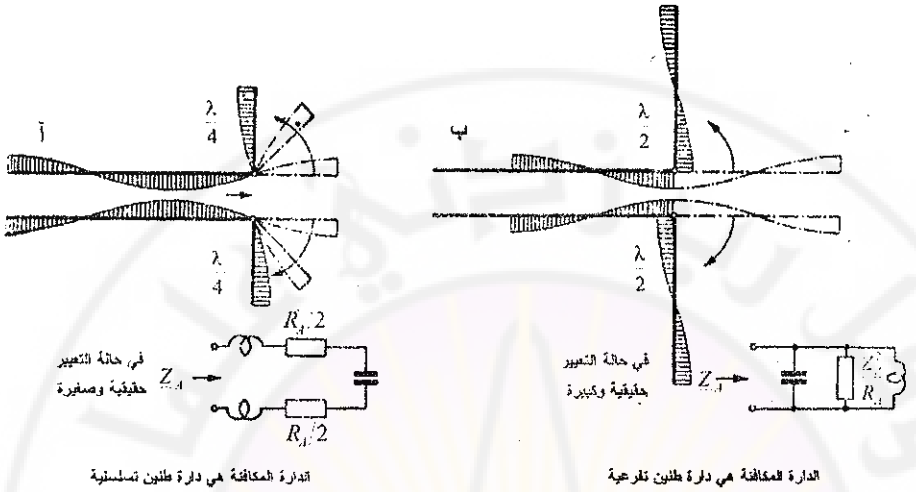
جـ- طول الناقل $\lambda/4 < l < \lambda/2$ حيث يؤثر الناقل كتحريض.

د - طول الناقل $\lambda/2$ حيث يحدث الطنين الثاني. يوجد عند مدخل الناقل بطن جهد وعقدة تيار حاصل قسمتهما قيمة لانهائية بالكبر، وهذا يكافئ دارة طنين تفرعية تهتز في حالة طنين.

هـ- طول الناقل $\lambda/2 < l < 3\lambda/2$ حيث يؤثر الناقل مرة ثانية كسعة.

وتعبر مواضع العقد والبطون بوضوح عن نشوء أمواج مستقرة على الهوائي، وبذلك نشوء قدرة تخيلية متأرجحة بالإضافة إلى القدرة الحقيقية. وتحوي ممانعة المدخل مركبة تخيلية عندما تتشكل قدرات تخيلية. وتنعدم المركبة التخيلية فقط عندما يكون الهوائي معيراً أو عندما تتخذ إجراءات لإزالة المركبة التخيلية. وكما هي الحال في كل دارة طنين تكون الجهود والتيارات التخيلية في الهوائي أكبر من الجهود والتيارات الحقيقية بمقدار جودة طنين دارة الهوائي. وتطغى الجهود والتيارات التخيلية بالقرب من الهوائي على الجهود والتيارات

الحقيقية لأن قيمها تساوي أضعاف قيم الأخيرة، وبحيث تحدد هي بالدرجة الأولى شكل توزع الجهد والتيار على الهوائي. وتؤثر المركبات الحقيقية للجهد والتيار فقط على شكل تشويه بسيط لشكل منحني التوزع الجيبي.



الشكل ٣-٤ : الديبول كناقل تردد عالي مفرود عند نهايته ودارته المكافئة

آ- ديبول بطول نصف الموجة ب- ديبول بطول موجة كاملة

يشابه منحني تغير X_A بعلاقة طول الهوائي أو الديبول، عندما يكون التردد ثابت، منحني تغير ممانعة مدخل ناقل تردد عالٍ مفتوح عند نهايته $\underline{Z}_l$ (انظر الشكل ٣-٣). ويمكن بالتقريب الأول اعتبار الديبول ناقل تردد عالٍ مفتوح فرد عند نهايته. ويوضح الشكل (٣-٤) ذلك عندما يكون:

آ - موضع ثني سلكي ناقل التردد العالي على بعد $\lambda/4$ من نهايته.

ب- موضع ثني سلكي ناقل التردد العالي على بعد $\lambda/2$ من نهايته.

وقد رسم توزع الجهد في الشكل (٣-٤) لحالة التحريض المتناظر لسلكي الناقل بالنسبة للأرض.

مقاومة مدخل ناقل تردد عالٍ مفتوح هي مقاومة تخيلية فقط وتحسب بموجب القانون:

$$\underline{Z}_l = jX_l = -jZ_L \cot \beta l = -jZ_L \cot \frac{2\pi}{\lambda} l$$

حيث Z_L المقاومة المميزة للناقل وتحسب بموجب العلاقة $Z_L = \sqrt{L_{St.}/C_{St.}}$ (انظر المعادلة ١-٢).

بشكل مكافئ نحسب قيمة المقاومة التخيلية للهوائيات بموجب القانونين التاليين، وهما صالحان بشكل خاص عندما تكون قيمة المقاومة الإشعاعية قابلة للإهمال بالمقارنة مع قيمة المقاومة التخيلية.

هوائي ديبول
$$jX_A = -jZ_D \cot\frac{\pi \cdot l}{\lambda} \qquad (٣-٧)$$

هوائي عمودي
$$jX_A = -jZ_A \cot\frac{2\pi \cdot h}{\lambda} \qquad (٣-٨)$$

حيث Z_D المقاومة المميزة للديبول و Z_A المقاومة المميزة للهوائي العمودي.

وتحسب المقاومة المميزة لديبول قطره d وطوله l بموجب المعادلة التالية (انظر المعادلة ١-٥).

المقاومة المميزة لهوائي ديبول
$$Z_{D/\Omega} = 120 \ln 0.575 \frac{l_{/cm}}{d_{/cm}} \qquad (٣-٩)$$

كما تحسب المقاومة المميزة لهوائي عمودي ذي ارتفاع منخفض بالنسبة لسطح الأرض بموجب المعادلة التالية.

المقاومة المميزة لهوائي عمودي
$$Z_{A/\Omega} = 60 \ln 1.15 \frac{h_{/cm}}{d_{/cm}} \qquad (٣-١٠)$$

وتنجم هذه المعادلة نتيجة تعويض $L_{St.}$ و$C_{St.}$ للهوائي العمودي في العلاقة $Z_A = \sqrt{L_{St.}/C_{St.}}$ (انظر المعادلتين ١-٣ و ١-٤) حيث :

$$L_{St./nH} = 2h_{/cm} \ln 1.15 \frac{h_{/cm}}{d_{/cm}} \quad \text{و} \quad C_{St./pF} = 1.113 \frac{h_{/cm}}{2 \ln 1.15 \frac{h_{/cm}}{d_{/cm}}}$$

ويعني التابع *cot.* السالب الموجود في المعادلتين (٣-٧) و (٣-٨) (انظر الشكل ٣-٣) أن:

- المقاومة التخيلية للديبول الذي طوله أصغر من نصف الموجة $l < \lambda/2$ وللهوائي العمودي الذي ارتفاعه أصغر من ربع الموجة $h < \lambda/4$ هي مقاومة تخيلية سعوية.
- المقاومة التخيلية للديبول بطول نصف الموجة $l = \lambda/2$ وللهوائي العمودي بارتفاع ربع الموجة $h = \lambda / 4$ تساوي الصفر، وهذا يكافئ دارة اهتزاز تسلسلية تهتز في حالة طنين.
- المقاومة التخيلية للديبول الذي طوله أكبر من نصف الموجة وأصغر من طول الموجة

$\lambda > l > \lambda/2$ وللهوائي العمودي الذي ارتفاعه أكبر من ربع الموجة وأصغر من نصف الموجة $\lambda/2 > h > \lambda/4$ هي مقاومة تخيلية تحريضية.

- المقاومة التخيلية للديبول بطول الموجة $l = \lambda$ وللهوائي العمودي بارتفاع نصف الموجة $h = \lambda/2$ هي لانهائية بالكبر، وهذا يكافئ دارة اهتزاز تفرعية تهتز في حالة طنين.

٣- ممانعة مدخل الهوائي

يمكن الحصول على قيمة الممانعة الكلية عند مدخل الهوائي $\underline{Z}_A$ بدمج مناسب لقيمة المقاومة الحقيقية مع قيمة المقاومة التخيلية. ويمكن جمع R_A و X_A جمعاً شعاعياً بالقرب من نقطة الطنين الأولى حيث في حالة الديبول $l \approx \lambda/2$ ، نظراً لأن كلتا المقاومتين موصولتان على التسلسل كما هو مبين في الدارة المكافئة (الشكل ١-٤). إلا أن ذلك غير ممكن بالقرب من نقطة الطنين الثانية حيث $l \approx \lambda$.

وقد تم التوصل إلى الشكل التالي لمعادلة حساب ممانعة مدخل الديبول:

هوائي ديبول

$$\underline{Z}_A = \frac{R_A - jZ_D \sin\frac{\pi \cdot l}{\lambda}\cos\frac{\pi \cdot l}{\lambda}}{\sin^2\frac{\pi \cdot l}{\lambda} + (\frac{R_A}{Z_D})^2 \cos^2\frac{\pi \cdot l}{\lambda}} \qquad (١١-٣)$$

وإلى الشكل التالي لمعادلة حساب ممانعة مدخل هوائي عمودي:

هوائي عمودي

$$\underline{Z}_A = \frac{R_A - jZ_A \sin\frac{2\pi \cdot h}{\lambda}\cos\frac{2\pi \cdot h}{\lambda}}{\sin^2\frac{2\pi \cdot h}{\lambda} + (\frac{R_A}{Z_A})^2 \cos^2\frac{2\pi \cdot h}{\lambda}} \qquad (١٢-٣)$$

١- عندما يكون الهوائي معيراً على موجته الأساسية، أي عندما يكون $l = \lambda/2$ و $h = \lambda/4$ يصبح شكل المعادلتين السابقتين:

$$Z_A - R_A$$

٢- عندما يكون الهوائي معيراً على موجته التوافقية الأولى، أي عندما يكون $l = \lambda$ و $h = \lambda/2$ يصبح شكل المعادلتين السابقتين :

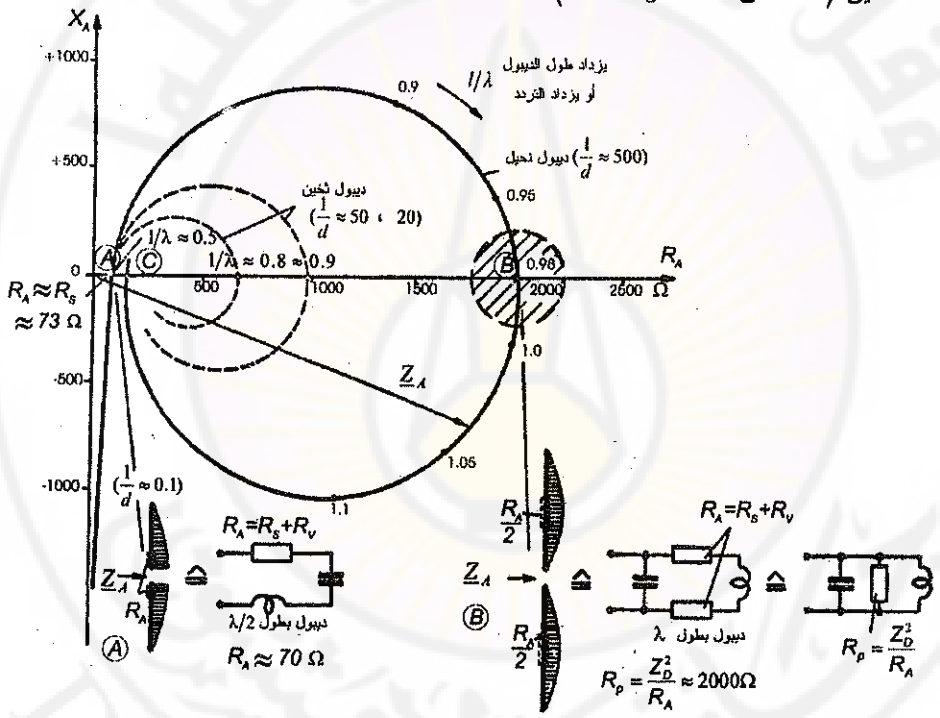
للهوائي للديبول $\underline{Z}_A = \frac{Z_D^2}{R_A}$ وللهوائي العمودي $\underline{Z}_A = \frac{Z_A^2}{R_A}$

يبين العمل الهندسي المرسوم بخط مستمر في الشكل (٣-٥) علاقة ممانعة مدخل ديبول نحيل جداً بنسبة طوله إلى طول الموجة التي تم حسابها بموجب المعادلة (٣-١١). من الشكل يتبين

مايلي:

١- تطغى المقاومة التخيلية على المقاومة الحقيقية لأطوال الديبول الصغيرة $l \approx 0.1\ \lambda$. ويمتلك الديبول القصير بالدرجة الأولى ممانعة مدخل سعوية، كما هي الحال في ناقل التردد العالي غير المحمل.

٢- تنعدم المركبة التخيلية عند تعيير طول الديبول على تردد يكافئ $l = \lambda / 2$ (النقطة A في الشكل ٣-٥). وتصبح ممانعة مدخلة حقيقية تساوي $R_S + R_V$ ، وهي نحو ٧٣ أوم. (تظهر على مدخل ناقل تردد عالي غير محمل وبطول $\lambda/4$ وعديم الضياع مقاومة قصر تساوي الصفر). وتكافئ هذه الحالة دارة طنين تسلسلية تحوي مقاومة ضياع أومية بحتة وتهتز في حالة طنين (الشكلان ٣-٤ و ٣-٥).



الشكل ٣-٥: المحل الهندسي لممانعة مدخل ديبول بعلاقة النسبة l / λ ولدرجات نحالة مختلفة

٣- بازدياد طول الديبول وفي المجال $\lambda/2 < l < \lambda$ تصبح ممانعة مدخل الديبول تحريضية، كما هي الحال في ناقل التردد العالي المفتوح عند نهايته. وتصبح ممانعة مدخل الديبول مرة أخرى سعوية عندما يصبح طوله أكبر من طول الموجة $l > \lambda$.

٤- توجد نقطة الطنين الثانية عند $l \approx \lambda$ حيث R_p=2000Ω (النقطة B في الشكل ٣-٥). وتختلف في هذه النقطة مقاومة مدخل الديبول كثيراً عن مقاومة مدخل ناقل التردد العالي. وبينما يكون لناقل التردد العالي بطول $\lambda/2$ كدارة طنين تفرعية عديمة الضياع مقاومة مدخل لانهائية بالكبر، يكون للديبول بطول λ مقاومة مدخل نهائية القيمة R_p . سبب ذلك هو أن الديبول يشع قدرة حقيقية بعكس ناقل التردد العالي.

ولا تساوي هنا المقاومة المؤثرة عند مدخل الديبول R_p المقاومة الإشعاعية R_S الخاصة بديبول طوله $l = \lambda$. من الشكل (٣-٢) تكون قيمة المقاومة الإشعاعية $R_S = 180\ \Omega$ ، بينما يمكن أن تأخذ R_p قيماً تقع بين 1000 Ω و 2000 Ω . سبب ذلك هو أن R_S هي مقاومة خاصة تمثل فقط الاستطاعة المشعة من الهوائي. لهذا السبب افترض أنها موجودة في أسفل الهوائي.

في الحقيقية تشارك كل نقطة من نقاط الهوائي في إشعاع القدرة، وهذا يكافئ في الواقع مقاومة موزعة على جميع نقاط سلك الهوائي. لذلك رسمت R_S في الدارة المكافئة (الشكل ٣-٥) كمقاومة طولانية. ويمكن القول بكلمات أخرى إن R_S وأكبر قيمة فعالة للتيار على الهوائي تحددان الاستطاعة المشعة من الهوائي. لذلك يجب اعتبار R_S إما موزعة على امتداد سلك الهوائي أو مركزة حيث يسري أكبر تيار.

في الديبول بطول $\lambda/2$ يقع بطن التيار عند مدخل الهوائي. لذلك رسمت R_S عند مدخل الهوائي.

في الديبول بطول λ يقع موضع بطن التيار في منتصف كل من طرفي الهوائي. لذلك توجد R_S في الدارة المكافئة على التسلسل مع التحريض المؤثر. بذلك يمكن اعتبار الدارة المكافئة لديبول بطول λ دارة طنين تفرعية مختلطة ناجمة عن توصيل مكثف عديم الضياع مع ملف ذي ضياع على التفرع، بدلاً من دارة طنين تفرعية بحته.

من المعلوم أنه يمكن تحويل أي دارة تسلسلية R_S-L_S (الدارة المكافئة للملف) إلى دارة تفرعية مكافئة على المأخذين R_p-L_p. وبقدر ما تكون R_S في الدارة التسلسلية صغيرة تصبح R_p في الدارة التفرعية كبيرة. وإذا كانت R_S في الدارة التسلسلية صغيرة بالنسبة لـ X_S يمكن كتابة:

$$R_p = (\frac{\omega_0 \cdot L_S}{R_S})^2 = \frac{1}{L_S \cdot C}\frac{L_S^2}{R_S} = \frac{L_S}{C \cdot R_S} = \frac{Z_D^2}{R_S} \qquad \text{و} \qquad L_S \approx L_p$$

حيث $Z_D = \sqrt{L_{St.}/C_{St.}}$.

وعلى سبيل المثال إذا تم أختيار بعدي الهوائي l و d في المعادلة (٣-٩). بحيث تكون $Z_D = 600\ \Omega$ ، وكانت R_S تساوي نحو 180 Ω بموجب المنحني المرسوم في الشكل (٣-٢)، حيث $l/\lambda = 1$ ، تصبح قيمة المقاومة التفرعية التي تظهر على مأخذي الهوائي في حالة الطنين :

$$R_p = \frac{(600\,\Omega)^2}{180\,\Omega} = 2000\,\Omega$$

ويتم الحصول على نفس النتيجة إذا استخدمت المعادلة (٣-١١) في حساب $\underline{Z}_A$ عندما يكون طول الهوائي $l = \lambda$.

٥- يتقاطع الشكل الحلزوني للمحل الهندسي لممانعة مدخل الديبول مع المحور الحقيقي في العديد من النقاط. والنقطة التالية بعد النقطتين A و B هي النقطة C ، حيث يساوي طول الديبول $l = 3\ \lambda/2$. ويتواجد عند هذه النقطة مرة أخرى بطن تيار. بذلك يمكن اعتبار المقاومة الإشعاعية في هذه الحالة موجودة مرة أخرى عند موضع التغذية. وتبلغ قيمة هذه المقاومة بموجب المنحني المرسوم في الشكل (٣-٢) نحو ١٠٠ أوم.

مثال ٣-١ :

يوجد هوائي عمودي ارتفاعه $h = 10m$ وقطره $d = 1cm$. تقدر مقاومة ضياعه $R_V = 3\ \Omega$. المطلوب حساب:

١- التردد الذي يكون هذا الهوائي معيراً عليه(الموجة الأساسية).

٢- التيار والجهد عند نقطة التغذية إذا كان المطلوب أن يشع الهوائي استطاعة $P_S = 1.5\ KW$.

٣- القيمة الفعالة للجهد الناشئ عند نهاية الديبول.

٤- جودة الطنين ρ وعرض المجال B للهوائي إذا اعتبر دارة طنين تسلسلية.

الحل :

١- عندما يكون الهوائي معيراً على موجته الأساسية يصبح ارتفاعه $h = \lambda/4$ ، وبالتالي $\lambda = 4h$. من العلاقة $f = c/\lambda$ ينتج :

$$f_0 = \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{40m} = 7.5MHz$$

٢- حساب الجهد والتيار عند نقطة التغذية

يحسب التيار عند نقطة التغذية بموجب المعادلة (٣-١)، $P_S = R_S I^2$. ويمكن حساب R_S بموجب المعادلة (٣-٣) ، إلا أن المقاومة الإشعاعية لهوائي عمودي معير معروفة بدقة وهي $R_S = 36.6\,\Omega$. منه ينتج:

$$I = \sqrt{\frac{P_S}{R_S}} = \sqrt{\frac{1500W}{36.6\Omega}} = 6.4A$$

تحدد المقاومة الكلية عند مدخل الهوائي، وهي في هذه الحالة مقاومة حقيقية، الجهد اللازم في نقطة التغذية.

$$R_A = R_S + R_V = 36.6 + 3 = 39.6\,\Omega$$
$$U = R_A \cdot I = 39.6 \cdot 6.4 = 253.4V$$

٣- القيمة الفعالة للجهد عند نهاية الهوائي

يحدد الجهد الناشئ عند نهاية الهوائي بموجب المعادلة (١-١) $U_{max} = Z_A \cdot I_{max}$.

وتحسب المقاومة المميزة للهوائي العمودي بموجب المعادلة (٣-١٠)

$$Z_A = 60 \ln 1.15 \frac{h_{/cm}}{d_{/cm}} = 60 \ln 1.15 \frac{1000}{1} = 423\Omega$$

بذلك يكون :

$$U_{max} = 423 \cdot 6.4 = 2706V$$

٤- جودة الطنين وعرض المجال

بشكل مكافئ لتعريف جودة الطنين لدارة طنين تسلسلية مركزة، وهي نسبة أقصى جهد ينشأ على السعة إلى جهد التغذية، تكون جودة طنين الهوائي:

$$\rho = \frac{U_{max}}{U} = \frac{2706}{253.4} = 10.68$$

كما يمكن حساب ρ بموجب العلاقة المعروفة :

$$\rho = \frac{1}{d} = \frac{\omega_0 L}{R_A} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \frac{L}{R_A} = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{1}{R_A} = \frac{Z_A}{R_A} = \frac{423}{39.6} = 10.68$$

حيث $Z_A = \sqrt{\frac{L_{St.}}{C_{St.}}}$

وبحسب عرض المجال B بموجب العلاقة .

$$B = \frac{f_0}{\rho} = \frac{7.5MHz}{10.68} = 0.7MHz$$

مثال ٣-٢ :

لدينا هوائي ديبول متوضع عمودياً بالنسبة لسطح الأرض. طول الديبول $l = 3\ m$ وقطره $d = 1\ cm$ ومقاومة ضياعة $R_V = 1\ \Omega$. يشع الهوائي استطاعة $P_S = 2\ KW$ بموجة طوله $\lambda = 7\ m$. المطلوب حساب:

١- ممانعة مدخل الهوائي $\underline{Z}_A = R_A + jX_A$.

٢- التيار I والجهد U_A عند مدخل الهوائي.

٣- الاستطاعة التي يقدمها جهاز الإرسال إلى الهوائي.

٤- الجهد عند نهايتي الهوائي.

٥- مردود الهوائي.

المطلوب أيضاً رسم المخطط الإشعاعي لهذا الهوائي في المستوي الأفقي وفي المستوي الشاقولي.

الحل :

١- ممانعة مدخل الهوائي

الهوائي غير معير لأن طوله $3\ m$ بينما نصف طول الموجة يساوي $3.5\ m$.

نحسب المقاومة الإشعاعية بموجب المعادلة (٣-٤) حيث $l_{eff} = \frac{2}{\pi} l = \frac{2}{\pi} 3 = 1.91m$

$$R_S = 800 (\frac{l_{eff}}{\lambda})^2 = 800 (\frac{1.91}{7})^2 = 59.5\Omega$$

بذلك تكون المركبة الحقيقية لممانعة مدخل الهوائي.

$$R_A = R_S + R_V = 59.5 + 1 = 60.5\ \Omega$$

نحسب المركبة التخيلية لممانعة مدخل الهوائي بموجب المعادلة (٣-٧).

$$jX_A = -jZ_D \cot \frac{\pi \cdot l}{\lambda}$$

ونحسب المقاومة المميزة للديبول بموجب المعادلة (٣-٩).

$$Z_D = 120 \ln 0.575 \frac{l_{/cm}}{d_{/cm}} = 120 \ln 0.575 \frac{300}{1} = 618\Omega$$

$$jX_A = -j620 \cot \pi \frac{300}{700} = -620 \cot 77.1^\circ = -j141.5\Omega$$

وهي مركبة تخيلية سعوية نظراً لأن طول الهوائي أقل من نصف طول الموجة بذلك تكون ممانعة مدخل الهوائي (المعادلة ٣-٥).

$$\underline{Z}_A = R_A + jX_A = (60.5 - j141.5)\Omega$$

وتكون المقاومة الظاهرية عند مدخل الهوائي.

$$\left|\underline{Z}_A\right| = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} = \sqrt{60.5^2 + 141.5^2} = 153.8\Omega$$

٢- التيار والجهد عند مدخل الهوائي.

نحسب تيار الهوائي بموجب المعادلة (٣-٢).

$$P_S = R_S \cdot I^2 \quad \rightarrow \quad I = \sqrt{\frac{P_S}{R_S}} = \sqrt{\frac{2000}{59.5}\frac{W}{\Omega}} = 5.79A$$

بذلك يكون الجهد عند مدخل الهوائي، كما هي الحال في دارة طنين تسلسلية لاتهتز بحالة طنين

$$U = \left|\underline{Z}_A\right| \cdot I = 153.8\Omega \cdot 5.79A = 890V$$

٣- الاستطاعة التي يقدمها جهاز الإرسال إلى الهوائي.

تحسب الاستطاعة الظاهرية P_A التي يقدمها جهاز الإرسال إلى الهوائي بشكل مكافئ لحالة قوة محركة كهربائية تغذي دارة طنين تسلسلية لا تهتز في حالة طنين.

$$P_A = \left|\underline{Z}_A\right| \cdot I^2 = U_A \cdot I = \frac{U_A^2}{\left|\underline{Z}_A\right|} = 153.8\Omega \cdot (5.79A)^2 = 5156VA$$

٤- الجهد عند نهاية الهوائي

يحسب الجهد عند نهاية الديبول بموجب المعادلة (١-١) عندما يكون الديبول معيراً. لذلك تنتج هذه المعادلة قيمة تقريبية عندما يكون الديبول غير معير.

$$U_{\max} = Z_D \cdot I_{\max} = 618\Omega \cdot 5.79A = 3578V$$

٥- مردود الهوائي

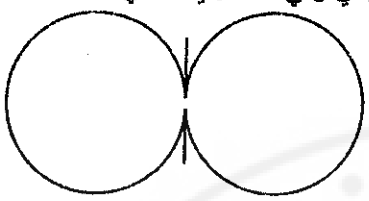
يكون مردود الديبول إذا حسب بموجب المعادلة (٣-٦):

$$\eta = \frac{P_S}{P_S + P_V} = \frac{R_S}{R_S + R_V} = \frac{59.5}{59.5 + 1} = 0.983 \triangleq 98.3\%$$

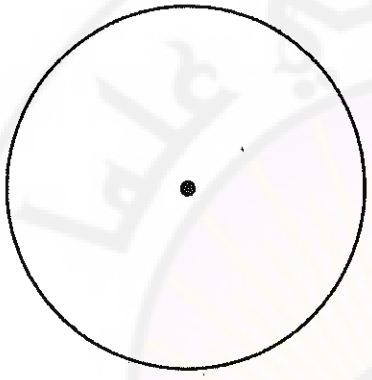
ويكون إذا حسب بموجب العلاقة التالية:

$$\eta = \frac{P_S}{P} = \frac{2000\,W}{5156\,VA} = 0.378 \triangleq 38.7\%$$

المخطط الإشعاعي لديبول عمودي في المستوي العمودي وفي المستوي الأفقي.



المخطط الإشعاعي في المستوي العمودي المنطبق على محور الديبول



المخطط الإشعاعي في المستوي الأفقي ، وهو عمودي على محور الديبول ويمر في منتصفه

مثال ٣-٣ :

نقيس على مدخل نصف ديبول مصنوع من سلك برونزي ارتفاعه $60\ m$ وقطره $1\ cm$ تيار تغذية شدته $10A$. تردد التشغيل هو $1.11\ MHz$. تقدر مقاومة ضياع الهوائي بحدود 1.2Ω.

المطلوب حساب :

١- ممانعة مدخل الهوائي في حالة التشغيل هذه.

٢- جهد الهوائي عند نقطة التغذية في أسفل الهوائي.

٣- الاستطاعة الظاهرية التي يأخذها الهوائي من جهاز الإرسال والاستطاعة الحقيقية في الجو المحيط به.

الحل :

نختبر أولاً إذا كان الهوائي معيراً أم غير معير. من تردد التشغيل نحصل على طول الموجة بموجب العلاقة.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{1.11 \cdot 10^6 s^{-1}} = 270\,m$$

يجب أن يكون ارتفاع الهوائي " نصف الديبول " في حالة الطنين $h = \frac{\lambda}{4} = 67.5m$. بذلك يكون هذا الهوائي الذي ارتفاعه $60\ m$ غير معبر وأقصر من ربع طول الموجة، وتحوي ممانعة مدخله بالإضافة إلى $R_A = R_S + R_V$ مقاومة تخيلية سعوية jX_A .

١- ممانعة مدخل الهوائي

نحسب المقاومة الإشعاعية حيث $h_{eff} = \frac{2}{\pi}h = \frac{2}{\pi}60m = 38.2m$. من المعادلة (٣-٤) نحصل :

$$R_S = 1579(\frac{h_{eff}}{\lambda})^2 = 1579(\frac{38.2}{270})^2 = 31.6\Omega$$

بذلك تكون المركبة الحقيقية لممانعة مدخل الديبول.

$$R_A = R_S + R_V = 31.6 + 1.2 = 32.8\Omega$$

نحسب المقاومة التخيلية والمقاومة المميزة لنصف الديبول بموجب المعادلتين (٣-٨) و(٣-١٠) .

$$Z_A = 60\ln 1.15\frac{h_{/cm}}{d_{/cm}} - 60\ln 1.15\frac{6000}{1} = 530\Omega$$

$$jX_A = -jZ_A \cot\frac{2\pi \cdot h}{\lambda} = -j530\cot\frac{2\pi \cdot 60}{270} = -j530\cot.80^\circ = -j93.4\Omega$$

بذلك تصبح ممانعة مدخل الهوائي (المعادلة ٣-٥).

$$|\underline{Z}_A| - R_A + jX_A - (32.8 - j93.4)\Omega$$

٢- الجهد عند نقطة التغذية.

المقاومة الظاهرية عند مدخل الهوائي هي :

$$|\underline{Z}_A| = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} = \sqrt{32.8^2 + 93.4^2} = 99\Omega$$

بذلك يكون الجهد عند مدخل الهوائي

$$U = |\underline{Z}_A| \cdot I = 99\Omega \cdot 10A = 990V$$

٣- الاستطاعة الظاهرية والاستطاعة الحقيقية

الاستطاعة الظاهرية

$$P_A = U \cdot I = 990V \cdot 10A = 9900VA = 9.9KVA$$

الاستطاعة الحقيقية

$$P_S = R_S \cdot I^2 = 31.6\Omega \cdot (10A)^2 = 3160W = 3.16KW$$

مسألة ٣-٤ :

يعمل جهاز إرسال على الموجة الطويلة $\lambda = 1000\ m$ ويغذي هوائيه بتيار شدته I=100 A. الارتفاع الفعال للهوائي هو $100\ m$. احسب الارتفاع الهندسي (الحقيقي) للهوائي والاستطاعة المشعة من الهوائي.

مسألة ٣-٥ :

يعمل جهاز إرسال على الموجة القصيرة $\lambda = 50\ m$ ويغذي ديبول طوله $l = 16\ m$ بتيار شدته $I = 10\ A$. احسب الاستطاعة التي يشعها الهوائي.

مسألة ٣-٦ :

لدينا هوائيان ديبول طول الأول $2.25m$ ومقاومة ضياعه Ω 1.8 ، وطول الثاني $2.5m$ ومقاومة ضياعه Ω 2 . قطر سلك كل من الهوائيين $1cm$. المطلوب أن يشع كل من الهوائيين استطاعة قدرها $1KW$على موجة طولها $4.5m$. المطلوب حساب :

١- التيار والجهد عند مدخل كل من الهوائيين.

٢- الاستطاعة التي يأخذها كل من الهوائيين من جهاز الإرسال.

٣- الجهد عند نهاية كل من الهوائيين.

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

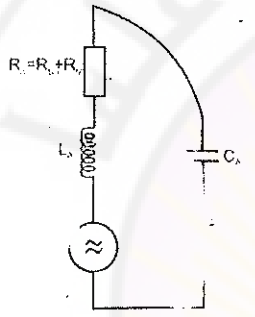
الفصل الرابع

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
Damascus University

٤- تعيير الهوائيات بتحميلها ميكانيكياً أو كهربائياً

يمكن في مجال الأمواج القصيرة والقصيرة جداً تعيير ديبول أو هوائي عمودي على تردد الإرسال باختيار طوله بشكل صحيح، أي بطول $\lambda/2$ في حالة الديبول وبطول $\lambda/4$ في حالة الهوائي العمودي. في مجال الأمواج الأطول، مثلاً في مجال الأمواج الطويلة والمتوسطة الإذاعية، لا يمكن غالباً جعل الهوائي العمودي عالياً بحيث يكون ارتفاعه $h=\lambda/4$ ، وذلك لأسباب تقنية إنشائية. لذلك يتم اللجوء إلى ما يسمى تحميل الهوائي، بزيادة طوله وجعله يهتز في حالة طنين على تردد يساوي تردد جهاز الإرسال. ويتم التمييز بين تعيير الهوائيات بتحميلها ميكانيكياً أو كهربائياً حسب نوع الهوائي وحالة التشغيل.



الشكل ٤-١ : الدارة المكافئة للهوائي العمودي بطول $\lambda/4$

في حالات قليلة هناك حاجة أيضاً لإنقاص طول الهوائي بتحميله كهربائياً ليهتز في حالة طنين على تردد يساوي تردد جهاز الإرسال.

الدارة المكافئة للهوائي العمودي بطول $\lambda/4$ (الشكل ٤-١)، كما هي الحال بالنسبة للديبول بطول $\lambda/2$ (الشكل ٤-١)، هي دارة طنين تسلسلية بحتة ترددها الذاتي الأول (معادلة٤-٦).

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_A C_A}} \qquad (٤-١)$$

وممانعة دخلها

$$\underline{Z}_A = R_A + j(\omega L_A - \frac{1}{\omega C_A}) \qquad (٤-٢)$$

ونميز فيما يلي حالات التشغيل الثلاثة الممكنة لهذه الدارة مع مراعاة أن :

f_0 و λ_0 تردد الطنين الذاتي الأول وطول الموجة الأساسية الذاتية للهوائي.

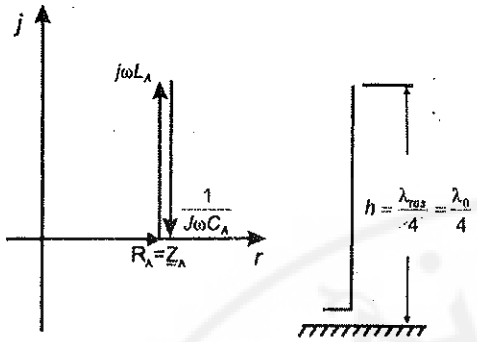
f_{res} و λ_{res} التردد وطول الموجة المطلوب أن يهتز عليهما الهوائي (تردد جهاز الإرسال).

الحالة الأولى $h = \lambda_{res}/4$:

يحرض الهوائي بتردد f_{res} يساوي إلى تردده الذاتي f_0 ، ويهتز في حالة طنين حيث :

$$\lambda_0 = \lambda_{res} \quad \text{و} \quad f_0 = f_{res}$$

بذلك تكون ممانعة مدخله مقاومة حقيقية $\underline{Z}_A = R_A$ ، ولا يحتاج الهوائي إلى تحميل.



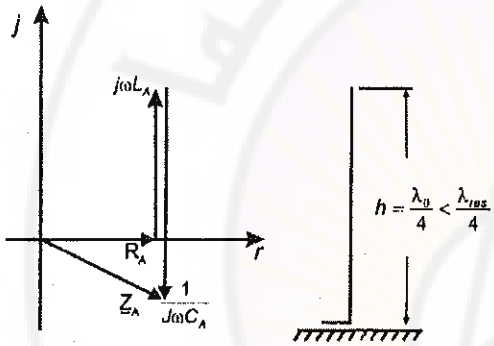
الشكل ٤-٢ : هوائي عمودي معير $f_0 = f_{res}$ والمخطط الشعاعي لدارته المكافئة.

الحالة الثانية $h < \lambda_{res}/4$:

يحرض الهوائي بتردد f_{res} أصغر من تردده الذاتي f_0 ، أي بطول موجة λ_{res} أكبر من طول موجته الأساسية الذاتية λ_0. ولا يهتز الهوائي في حالة طنين حيث:

$$\lambda_0 < \lambda_{res} \quad \text{و} \quad f_0 > f_{res}$$

بذلك تكون ممانعة مدخله عقدية ذات مركبة تخيلية سعوية.



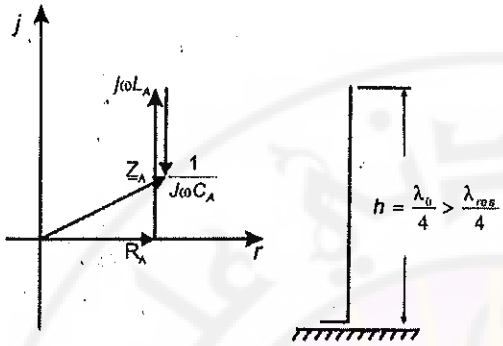
الشكل ٤-٣ : هوائي عمودي غير معير $f_0 > f_{res}$ والمخطط الشعاعي لدارته المكافئة.

بالتالي يجب زيادة λ_0 (زيادة طول الهوائي)، أي إنقاص التردد الذاتي f_0 . ويتم إنقاص f_0 إما بزيادة تحريض الهوائي (زيادة $j\omega L$) أو زيادة سعة الهوائي (إنقاص $1/j\omega C$) بحيث تصبح ممانعة مدخل الهوائي $\underline{Z}_A$ حقيقية كما في الشكل (٤-٢). يمكن زيادة تحريض الهوائي L_A بتوصيل ملف تحريضه L_0 معه على التسلسل، أو زيادة سعة الهوائي C_A بتحقيق (وليس بتوصيل) سعة C'_A تؤثر على التفرع مع C_A، بحيث تصبح $\lambda_0 = \lambda_{res}$ و $f_0 = f_{res}$. وتجدر الإشارة إلى أنه من المستحيل عملياً زيادة سعة الهوائي بتوصيل مكثف على التفرع مع الهوائي.

الحالة الثالثة $h > \lambda_{res}/4$:

يحرض الهوائي بتردد f_{res} أكبر من تردده الذاتي f_0 ، أي بطول موجة λ_{res} أصغر من طول موجته الأساسية λ_0 . ولا يهتز الهوائي في حالة طنين حيث :

$$f_0 < f_{res} \quad \text{و} \quad \lambda_0 > \lambda_{res}$$



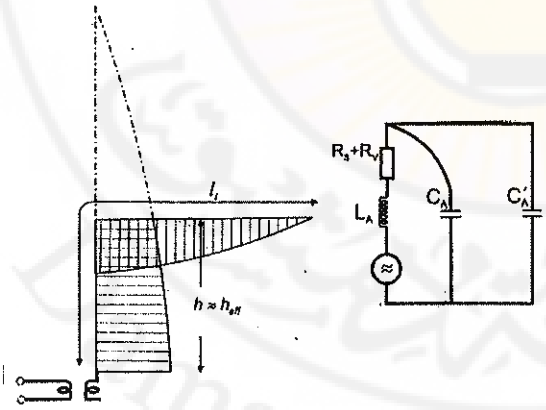
الشكل ٤-٤ : هوائي عمودي غير معير $f_0 < f_{res}$ والمخطط الشعاعي لدارته المكافئة.

بذلك تكون ممانعة مدخله عقدية ذات مركبة تخيلية تحريضية. بالتالي يجب إنقاص λ_0 (إنقاص طول الهوائي)، أي زيادة التردد الذاتي f_0 . وتتم زيادة f_0 إما بإنقاص تحريض الهوائي (إنقاص $j\omega L$)أو إنقاص سعة الهوائي (زيادة $1/j\omega C$) بحيث تصبح ممانعة مدخل الهوائي $\underline{Z}_A$ حقيقية كما في الشكل (٤-٢).

يمكن إنقاص سعة الهوائي C_A بتوصيل مكثف سعته C_0 معها على التسلسل. ولايمكن إنقاص تحريض الهوائي L_A بتوصيل أو تحقيق تحريض معه على التفرع إذ من المستحيل عملياً توصيل ملف على التفرع مع الهوائي.

٤-١ تعيير الهوائيات بالتحميل الميكانيكي

إحدى حالات التحميل الميكانيكي هي ثني جزء من سلك الهوائي العمودي بطول $h = \lambda/4$ الذي لا يمكن تثبيته بشكل شاقولي وتثبيته بشكل أفقي كما هو مبين في الشكل (٤-٥). ولا تساعد قطعة السلك الأفقية على الإشعاع على امتداد سطح الأرض إلا قليلاً ، نظراً لأن السلك لا يشع باتجاهي محوره. إلا أن سلك الهوائي الكلي يصبح بهذه الطريقة على الأقل



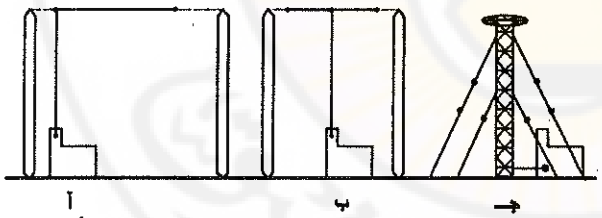
الشكل ٤-٥: الهوائي العمودي المثني ودارته المكافئة (هوائي L).

معيراً ، ويصبح قادراً على سحب أكبر تيار وأكبر جهد ممكن من جهاز الإرسال . وتصبح المركبة التخيلية لممانعة مدخل الهوائي مساوية للصفر أي تصبح $\underline{Z} = R_A$. بذلك ينشأ ما يسمى" هوائي L ".

إن توزع الجهد والتيار على امتداد سلك الهوائي L بجزأيه العمودي والأفقي هو مثل توزع الجهد والتيار على هوائي عمودي محرض بتردد يساوي تردده الذاتي تقريباً. وكما يتبين من الشكل (٤-٥) يكون الارتفاع الفعال h_{eff} للهوائي L مساوياً عملياً للارتفاع الهندسي h ، وذلك بسبب ثبات شدة التيار في الجزء العمودي من سلك الهوائي تقريباً.، بهذه الطريقة تزداد قيمة السعة الكلية للهوائي نتيجة وجود القطعة الأفقية من سلك الهوائي الموازية لسطح الأرض بسعة إضافية C_A' بالنسبة لسطح الأرض. وتصبح السعة الكلية للهوائي مساوية إلى $C_A + C_A'$. بازدياد السعة الكلية للهوائي ينقص تردده الذاتي (معادلة ٤-١)، أي يزداد طوله. في الحقيقة لايطابق توزع التيار في الهوائي L والمرسوم في الشكل (٤-٥) ظروف توزع التيار على هوائي عمودي عادي تماماً، على الرغم من أن طول كل منهما هو $\lambda/4$. سبب ذلك هو أن توزع السعات على امتداد الجزء الأفقي من سلك الهوائي L هو أكبر مما لو كان هذا الجزء الأفقي مثبتاً بشكل عمودي.

ينجم عن ذلك تغير مفاجئ للمقاومة المميزة للهوائي $Z_A = \sqrt{L_{st.}/C_{st.}}$ عند نقطة ثني الهوائي. بذلك يتأثر توزع الجهد والتيار على سلك الهوائي وتتغير مقاومة مدخله وينقص تردده الذاتي، أي يزداد طول موجته الأساسية وبذلك يزداد طوله.

يبين الشكل (٤-٦) بالإضافة إلى الهوائي L شكلين آخرين من أشكال الهوائيات المحملة ميكانيكياً وهما " الهوائي T " و"الهوائي ذو السعة السقفية".



الشكل ٤-٦ : أشكال متعددة لهوائيات محملة سعوياً

آ- هوائي L ب- هوائي T جـ- هوائي ذو سعة سقفية

هذه الهوائيات الثلاثة شائعة الاستعمال في الحياة العملية.

إذا أريد لمثل هذه الهوائيات المحملة ميكانيكياً أن تهتز في حالة طنين عند تحرضها بتردد معين f_{res} فيجب أن يكون طول سلك الهوائي الهندسي h أصغر من ربع طول الموجة $\lambda/4$ المكافئ لهذا التردد . وإذا رمزنا بـ l_t لأطول طريق للتيار مقاساً من أسفل الهوائي ورمزنا

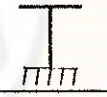
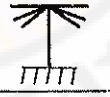
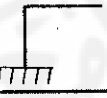
بـ λ_{res} لطول الموجة المراد تعيير الهوائي عليها بحيث يهتز في حالة طنين، فيجب أن يكون:

$$l_i = \frac{\lambda_{res}}{k} \qquad (٤-٣)$$

يحوي الجدول (٤-١) قيم k لعدد من الهوائيات شائعة الاستعمال، وقد تم تحديد هذه القيم بالقياسات العملية.

يسري مفعول قيم k المدرجة في الجدول (٤-١) عندما تكون درجة نحالة سلك الهوائي العمودي كبيرة. وكما ورد سابقاً نقصان طول الهوائيات العمودية والديبولات هو أنها ليست لا متناهية في النحالة بل لها ثخانة معينة. بذلك تحصل نهايات أسلاك الهوائيات على سعة إضافية مع الأرض C_A' والتي تسبب زيادة طول موجة الطنين الذاتية للهوائي العمودي عن $4h$ وللديبول عن $2l$.

الجدول ٤-١ : قيم k لعدد من الهوائيات المحملة ميكانيكياً

شكل الهوائي	اسم الهوائي	قيمة k
	هوائي عمودي مؤرض	4.1
	هوائي T ضيقة	4.5 - 5
	هوائي T عريضة طول السلك الأفقي (2...3h)	9 - 10
	هوائي مع مظلة	6 – 8
	هوائي مع مظلة عدد أسلاك المظلة كبير	8 - 10
	هوائي L	5.5

مثال ٤-١ :

المطلوب أن يشع هوائي L ارتفاعه $h = 40\ m$ موجة طولها $\lambda = 600\ m$. احسب طول الجزء الأفقي من سلك الهوائي.

الحل :

نحسب بموجب المعادلة (٤-٣) الطول الكلي للهوائي بجزأيه الأفقي والعمودي. من الجدول (٤-١) نحصل على قيمة k للهوائي L وهي 5.5 . بذلك يكون

$$l_i = \frac{\lambda_{res}}{k} = \frac{600m}{5.5} = 109m$$

ويكون الجزء الأفقي من الهوائي L

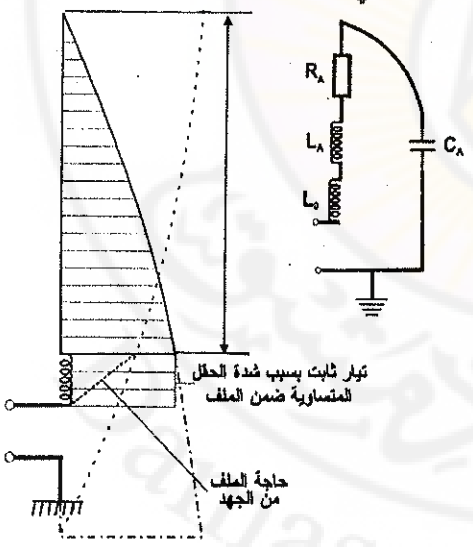
$$l = l_i - h = 109 - 40 = 69\ m$$

٤-٢ تعيير الهوائيات بالتحميل الكهربائي

عوضاً عن زيادة طول هوائي قصير بتحميله ميكانيكياً وذلك بثنيه ووصله بقطعة سلك أفقية، يمكن تعيير الهوائي القصير كهربائياً وذلك بتوصيل " ملف زيادة طول " في أسفل الهوائي. ويسبب توصيل الملف زيادة تحريض الهوائي وبذلك إنقاص التردد الذاتي للهوائي، أي زيادة طول الموجة الأساسية الذاتية وبالتالي زيادة طول الهوائي. يبين الشكل (٤-٧) توزع الجهد والتيار على هوائي محمل بهذه الطريقة في أسفله. من الشكل يتبين أن عقدة الجهد وبطن التيار قد انزاحا بسبب وجود هذا الملف إلى موضع يخص هوائياً ارتفاعه أكبر من الارتفاع الحقيقي للهوائي المستعمل.

ميزة ملف زيادة الطول هي سهولة تركيبه في أسفل الهوائي. كذلك يمكن الملف من إجراء التعيير الدقيق أثناء التشغيل بسهولة.

سيئة ملف زيادة الطول بالمقارنة مع التعيير الميكانيكي للهوائي هي أنه يسبب نقصان الارتفاع الفعال للهوائي h_{eff} إلى $0.5h$ بدلاً من $2h/\pi$ (الشكل ٣-١)، وذلك لأن توصيل الملف في أسفل الهوائي يسبب تركيزاً شديداً لجزء من الحقل ضمنه ومنعه من الإشعاع، كما هي الحال في دارة الطنين المركزة. لذلك يصحح عملياً طول الهوائيات بواسطة ملفات زيادة الطول بمقدار 20 – 10 % من طول الموجة.



الشكل ٤- ٧ : تعيير هوائي قصير بواسطة ملف زيادة طول

تحدد قيمة تحريض ملف زيادة الطول L_0 انطلاقاً من الفكرة التالية:

ممانعة مدخل الهوائي بالقرب من نقطة طنينه الأولى وبدون ملف زيادة الطول هي $\underline{Z}_A = R_A + jX_A$. بعد وضع ملف زيادة الطول في أسفل الهوائي L_0 تصبح ممانعة الدارة التسلسلية للملف والهوائي.

$$\underline{Z}_A = R_A + jX_A + j\omega L_0 = R_A - jZ_A \cot\frac{2\pi h}{\lambda} + j\omega L_0 \qquad (٤-٤)$$

ويكون نظام الهوائي الجديد معيراً ويهتز في حالة طنين عندما تكون ممانعة مدخل الهوائي حقيقية فقط، أي :

$$\underline{Z}_A = R_S + R_V$$

ذلك يعني أن مقاومة الملف التخيلية يجب أن تكون كبيرة بشكل تساوي فيه المركبة السعوية التخيلية في ممانعة مدخل الهوائي jX_A ، أي :

$$\omega_0 L_0 = Z_A \cot\frac{2\pi h}{\lambda}$$

ومنه:

$$L_0 = \frac{Z_A}{\omega_0}\cot\frac{2\pi h}{\lambda} \qquad (٥-٤)$$

يمكن بواسطة هذه المعادلة حساب قيمة تحريض ملف زيادة طول الهوائي عند معرفة مقاييس الهوائي بسهولة.

أما إذا كان طول الهوائي أكبر من ربع طول الموجة $h > \lambda_{res}/4$ (الحالة الثالثة في مقدمة هذا الفصل) وأريد تعييره على طول موجة أقصر من طول موجته الأساسية الذاتية ليهتز في حالة طنين، وجب إنقاص قيمة L_A أو قيمة C_A للهوائي (المعادلة ٤-١). ومن غير الممكن إنقاص تحريض الهوائي L_A كما ورد سابقاً. إلا أنه يمكن وبسهولة إنقاص قيمة سعة الهوائي C_A بتوصيل " مكثف إنقاص الطول " في أسفل الهوائي ". ويعتبر مكثف إنقاص الطول من وجهة نظر الدارة المكافئة موصولاً على التسلسل مع سعة الهوائي C_A . وبعكس السعة المصطنعة مع الأرض C_A' والموصولة على التفرع مع سعة الهوائي C_A والتي تعمل على زيادة سعة الهوائي وبالتالي زيادة طوله، يتم بواسطة مكثف إنقاص الطول الموصول على التسلسل في أسفل الهوائي إنقاص سعة دارة طنين الهوائي وبذلك إنقاص طوله. وبشكل مكافئ لطريقة تحديد قيمة تحريض ملف زيادة الطول، يمكن تحديد قيمة سعة مكثف تقصير طول

الهوائي بالشكل التالي :

$$Z_A = R_A - jZ_A \cot\frac{2\pi h}{\lambda} + \frac{1}{j\omega C_0}$$

ومنه

$$\frac{1}{\omega_0 C_0} = -Z_A \cot\frac{2\pi h}{\lambda}$$

أو

$$C_0 = -\frac{1}{\omega_0 Z_A \cot\frac{2\pi h}{\lambda}} \qquad (٤-٢)$$

مثال ٤-٢:

ليكن هوائي عمودي ارتفاعه $20\ m$ وقطر سلكه $0.15\ cm$.

١- المطلوب أن يعير هذا الهوائي كهربائياً ليصبح بطول $\lambda/4$ ويشع موجة طولها $200\ m$.

أ- كم متراً يجب زيادة طول الهوائي كهربائياً ؟

ب- ما قيمة L_0 ؟

٢- المطلوب أن يعير هذا الهوائي كهربائياً ليصبح بطول $\lambda/4$ ويشع موجة طولها $60\ m$ ؟

أ- كم متراً يجب إنقاص طول الهوائي كهربائياً ؟

ب- ما قيمة C_0 ؟

الحل :

١- طول الموجة المراد إشعاعها $\lambda = 100\ m$.

أ- عند إشعاع موجة طولها $100\ m$ يجب أن يكون طول الهوائي المعير $h = \frac{\lambda}{4} = 25m$ ،

أي يجب زيادة طول الهوائي بمقدار $\Delta h = 5\ m$. وتكون هذه الزيادة بالنسبة المئوية $\frac{\Delta h}{\lambda} = \frac{5}{100} \triangleq 5\%$ وهي أقل من 20% المشار إليها سابقاً.

ب- نحسب قيمة L_0 بموجب المعادلة (٤-٥).

$$L_0 = \frac{Z_A}{\omega_0}\cot\frac{2\pi h}{\lambda}$$

ونحسب المقاومة المميزة للهوائي العمودي Z_A بموجب المعادلة (٣-١٠).

$$Z_A = 60\ln 1.15\frac{h_{/cm}}{d_{/cm}} = 60\ln 1.15\frac{2000}{0.15} = 578\Omega$$

نحسب قيمة ω_0.

$$f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\cdot 10^8\ m/s}{100\,m} = 3MHz \rightarrow \omega_0 = 2\pi f_0 = 18.85\cdot 10^6\ s^{-1}$$

بالتعويض في المعادلة (٤-٥) نحصل :

$$L_0 = \frac{578\Omega}{18.85\cdot 10^6\ s^{-1}}\cot\frac{2\pi\cdot 20m}{100m} = 9.96\cdot 10^{-6}\ H = 9.96\mu H \approx 10\mu H$$

٢- طول الموجة المراد إشعاعها $\lambda = 60\ m$.

آ- عند إشعاع موجة طولها $60\ m$ يجب أن يكون طول الهوائي المعير $h = \frac{\lambda}{4} \doteq 15m$، أي يجب إنقاص طول الهوائي بمقدار $\Delta h = 5\ m$. ويكون هذا الإنقاص بالنسبة المئوية $\frac{\Delta h}{\lambda} = \frac{5}{60} \doteq 8.3\%$ ، وهي نسبة مقبولة.

ب- نحسب قيمة C_0 بموجب المعادلة (٤-٦).

$$C_0 = -\frac{1}{\omega_0 Z_A \cot\frac{2\pi h}{\lambda}}$$

حيث $Z_A = 578\Omega$ و $f_0 = \frac{c}{\lambda} = 5MHz$ و $\omega_0 = 31.4\cdot 10^6\ s^{-1}$

نعوض في المعادلة (٤-٦) فنحصل :

$$C_0 = -\frac{1}{31.4\cdot 10^6\ s^{-1}\cdot 578\cdot\cot\frac{2\pi\cdot 20m}{60m}} = 95\cdot 10^{-12}\ F = 95pF$$

مسألة ٤-٣ :

لدينا هوائي إرسال عمودي ارتفاعه $125\ m$ وقطر سلكه $1.5\ cm$. يحوي الهوائي في أسفله ملف زيادة طول قابلاً للتعيير . المطلوب أن يشع الهوائي أمواجاً يقع طولها بين λ_1=550 m و $\lambda_2 = 600\ m$.

١- في أي مجال يجب أن يكون الملف قابلاً للتعيير بحيث يعمل الهوائي في حالة طنين في مجال طول الموجة المشار إليه ؟

٢- احسب الجهد الهابط على الملف عند λ_1 و λ_2 إذا كانت شدة تيار تغذية الهوائي $60\ A$.

٣- احسب الاستطاعة المشعة من الهوائي عند λ_1 و λ_2 .

Damascus University

الفصل الخامس

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

٥- الهوائيات عريضة المجال

في الحياة العملية يشغل الهوائي عادة عند إحدى نقطتي طنينيه الأوليتين من نقاط طنينه العديدة. السبب هو أن ممانعة مدخل الهوائي تكون حقيقية بحتة في حالة الطنين فقط. ويسري عندها تيار كبير في الهوائي، ويشع الهوائي بذلك قدرة كهرطيسية أعظمية. عند تحريض الهوائي بتردد لا يطابق تردده الذاتي، أي عندما لا يهتز الهوائي في حالة طنين، عندها تشمل ممانعة مدخله مركبة تخيلية سعوية أو تحريضية بالإضافة إلى المركبة الحقيقية .

إن تعيير طول الهوائي على طول الموجة المراد إرسالها هو إحدى مشكلات تقنية الإرسال الرئيسية. ويجب عند إجراء عملية التعيير هذه مراعاة أن تردد جهاز الإرسال المعدل بإحدى طرق التعديل المعروفة لا يتكون من التردد الحامل فقط بل من مجال ترددي ما حسب طريقة التعديل المستخدمة. ويجب أن يكون تغير ممانعة مدخل الهوائي بالتردد ضمن كامل المجال الترددي المراد نقله ضئيلاً إذا ما أريد تجنب نشوء تشوهات شديدة في التعديل.

يبين المحل الهندسي المرسوم بخط مستمر في الشكل (٣-٥) والخاص بأسلاك هوائيات نحيلة $l/d \approx 500$ أنه إذا انطلقنا من النقطة $l/\lambda = 1$ وغيرنا التردد بمقدار $\pm 10\ \%$ يتم عندها مسح نصف دائرة المحل الهندسي تقريباً. هذا الشيء غير مرغوب به، ويجب أن يبقى رأس شعاع ممانعة مدخل الهوائي ضمن الدائرة المهشرة في كامل المجال الترددي المراد إرساله.

إحدى الطرق المتبعة للحصول على ممانعة مدخل ثابتة تقريباً ضمن المجال الترددي المراد إرساله هي استعمال ما يسمى " الهوائيات عريضة المجال ". ويمكن إتباع هذه الطريقة بشكل خاص في مجال الأمواج قصيرة الطول.

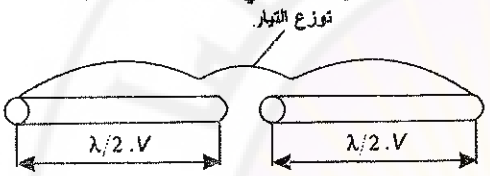
إن علاقة ممانعة مدخل ديبول بسيط مكون من سلكين نحيلين، وعلاقة ممانعة مدخل هوائي عمودي مكون من سلك واحد نحيل، الشديدة بالتردد تنجم بالدرجة الأولى من علاقة قيمة المقاومة التخيلية للهوائيين بالتردد. ويمكن التأثير على قيمة المقاومة التخيلية للهوائي باختيار مناسب لقيمة مقاومته المميزة Z_D ، Z_A كما يتبين من المعادلتين (٣-٧) و (٣-٨). وتنقص المقاومة التخيلية للهوائي بنقصان قيمة مقاومته المميزة.

مما سبق يتبين أنه للحصول على هوائي عريض المجال وجب جعل مقاومته المميزة صغيرة قدر الإمكان. بإلقاء نظرة على المعادلتين (٣-٩) و (٣-١٠) نرى أنه يمكن إنقاص قيمة المقاومة المميزة للهوائي بسهولة وذلك بزيادة قطر سلك الهوائي، أو بشكل عام تكبير مقطعه.

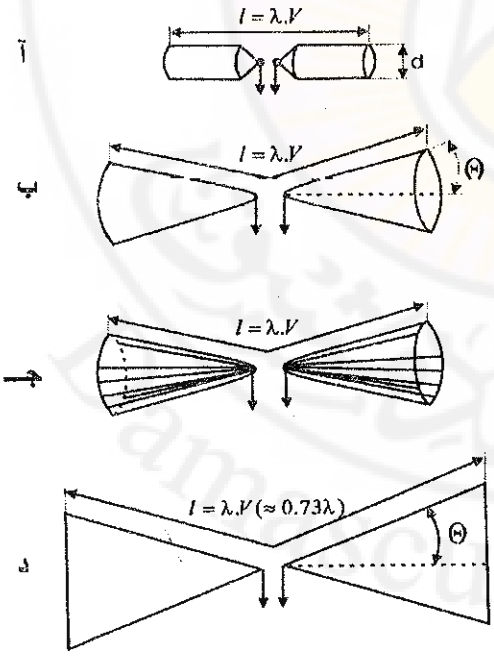
بكلمات أخرى يمكن القول إنه بازدياد درجة نحالة الهوائي تزداد سرعة كبر الجزء التخيلي في ممانعة مدخل الهوائي عند الانحراف عن الطنين، وينقص بذلك عرض مجال الهوائي. لذلك تستخدم ديبولات ذات درجة نحالة l / d منخفضة، تسمى أيضاً "الديبولات الثخينة"، عندما يراد تحقيق عرض مجال كبير للهوائي.

تصنع الديبولات الثخينة كديبولات بطول نصف الموجة وديبولات بطول الموجة. من منطلق عرض المجال تكون الديبولات بطول الموجة هي الأنسب نظراً لأنها تمتلك عرض مجال أكبر من الديبولات بطول نصف الموجة بمقدار ١,٣ ضعف وذلك عندما يكون لكلا الديبولين نفس درجة النحالة.

توزع التيار في الديبولات النحيلة هو جيبي الشكل. ولا يبقى كذلك في الديبولات الثخينة، بل هو تقريباً كما هو مبين في الشكل (٥-١) لديبول بطول الموجة. وتكون قيمة التيار في نقطتي التغذية لديبول ثخين بطول λ عالية نسبياً، وهذا يوضح سبب نقصان مقاومة مدخل الهوائي بصغر قيمة عامل النحالة.



الشكل ٥-١ : توزع التيار في ديبول ثخين بطول الموجة. V هو عامل تقصير الهوائي بعلاقة مقطعة



الشكل ٥-٢ : أشكال ديبولات ثخينة عريضة المجال.

آ - ديبول بطول الموجة مكون من قضيبين اسطوانيين مدببين عند نقطتي التغذية

ب - ديبول بطول الموجة مكون من مخروطين مصنوعين من صفيحتين معدنيتين

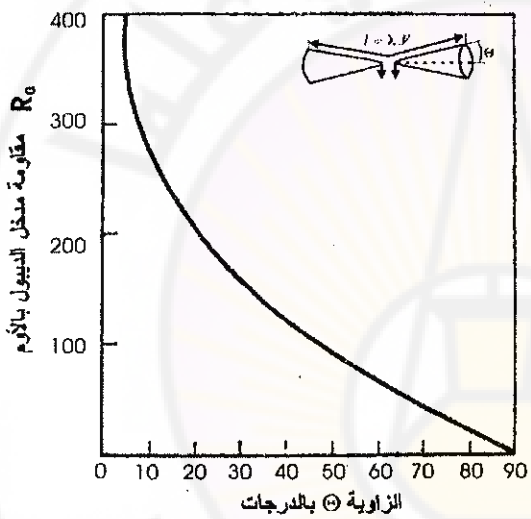
جـ- ديبول بطول الموجة مكون من هيكلي مخروطين . يصنع الهيكل من أسلاك عديدة قدر الإمكان

د - ديبول بطول الموجة مسطح على شكل جناحي فراشة .

إذا صنع الديبول عريض المجال من أنبوب اسطواني أو قضيب معدني ثخين (الشكل ٥-١)، بسبب سطحي مقطعي قضيبي الديبول المتقابلين سعة كبيرة عند نقطة التغذية. إضافة إلى ذلك يكون هنالك تغير مفاجئ كبير في المقطع عند موضع وصل ناقل التغذية بمدخل الهوائي. لذلك يدبب طرفا قضيبي الهوائي الثخينين عند موضع التغذية بشكل مخروطي كما هو مبين في الشكل (٥-٢-آ).

في العديد من الحالات يصنع نصفي الهوائي بحيث يمتد المخروط من نقطة التغذية حتى نهاية الهوائي(الشكل ٥-٢-ب). وينشأ عندها ما يسمى "الهوائي ذو المخروطين". تحدد الزاوية θ لهذا الشكل من الديبولات قيمة مقاومة مدخل الهوائي. ويبين الشكل (٥-٣) علاقة مقاومة مدخل الهوائي R_0 بالزاوية θ . بسبب عرض المجال الكبير لهذه الهوائيات تكون قيمة عامل التقصير V غير حرجة، ويحسب عادة بقيمة متوسطة له هي $V = 0.73$.

يمكن صنع الهوائي الديبول ذو المخروطين من هيكلي مخروطين سلكيين عدد أسلاكهما كبير قدر الإمكان، بحيث تكون مقاومة الهوائي للرياح ضئيلة ووزنه صغيراً (الشكل ٥-٢-جـ).

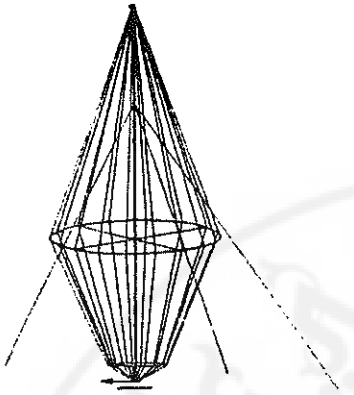


الشكل ٥-٣ : علاقة مقاومة مدخل ديبول مكون من مخروطين R_0 بالزاوية θ

يمكن التحول عن شكل المخروط الدوراني كلياً والانتقال إلى شكل مخروط مسطح أي إلى شكل مثلث . بذلك يتكون الديبول من جناحين مثلثي الشكل (الشكل ٥-٢-د)، ويسمى بديبول "جناح الفراشة". كما يمكن صنع سطحي الديبول مثلثي الشكل من شبك معدني ناعم بدلاً عن صفائح معدنية مصمتة لتقليل مقاومة الرياح . بذلك ينقص وزن الهوائي بدون أن تسوء صفاته الكهربائية بشكل ملحوظ. ويجب أن لا تزيد أبعاد فتحات الشبك على $0{,}005\lambda$. يحسب أيضاً في حالة ديبول جناح الفراشة بطول λ بعامل تقصير $V = 0{,}73$.



الشكل ٥-٥: هوائي ديبول أفقي هيكلي عريض المجال



الشكل ٥-٤ : هوائي عمودي مؤرض هيكلي عريض المجال

يبين الشكل (٥-٤) هوائي عمودي مؤرض عريض المجال بارتفاع $\lambda/4$. السعة بين نقطة تغذيته وسطح الأرض صغيرة، ومقاومة الهوائي للرياح ضئيلة.

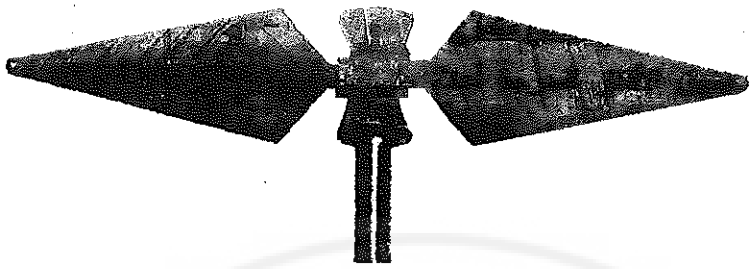
يبين الشكل (٥-٥) هوائي ديبول أفقي عريض المجال بطول $\lambda/2$. السعة بين نقطتي تغذيته صغيرة، ومقاومته للرياح ضئيلة.



الشكل ٥-٦ : هوائي ديبول عمودي عريض المجال مغذى بكابل محوري

يبين الشكل (٥-٦) هوائي ديبول عمودي عريض المجال مغذى محورياً بواسطة كابل محوري لا يمر في الحقل المشع.
تقع قيم عرض المجال b للديبولات عريضة المجال التي تم استعراضها فيما سبق، والتي تتعلق بمقاييس الديبولات، بين $b = 0.5\ f_0$ و $b = 0.8\ f_0$.

وأخيراً يبين الشكل (٥-٧) ديبول عريض المجال مستقطب أفقياً طوله نحو $\lambda/2$ وعرض مجاله 80-330 MHz . يحوي الهوائي عند مدخله عنصر تحويل من ناقل محوري غير متناظر إلى مدخل الديبول المتناظر. الهوائي من صنع شركة *Rohde und schwarz* .



الشكل ٥-٧ : صورة فوتوغرافية لهوائي ديبول عريض المجال. عرض مجاله 80-330 MHz

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل السادس

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

٦- هوائيات الاستقبال

٦-١ طريقة عمل هوائيات الاستقبال ودارتها المكافئة

مهمة هوائي الاستقبال أخذ أكبر قدرة ممكنة من الحقل الكهرطيسي الموجود في الجو المحيط به، والناجم عن إشعاع هوائي الإرسال لاستطاعة ما، وتقديم هذه القدرة إلى جهاز الاستقبال. إذا أهملنا الامتصاص في الجو وتأثير انحناء سطح الأرض تكون معادلات حساب القيمة الفعالة لشدة الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي في منطقة الاستقبال بالشكل التالي (بدون اشتقاق):

$$\left.\begin{aligned} E &= 120\pi \frac{I_{/A} \cdot h_{eff.T/m}}{r_{/Km} \cdot \lambda_{/m}} \quad [mV/m] \\ H &= \frac{I_{/A} \cdot h_{eff.T/m}}{r_{/Km} \cdot \lambda_{/m}} \quad [mA/m] \end{aligned}\right\} \quad \text{أكبر شدة حقل بعيد تنجم عن إشعاع هوائي عمودي} \qquad (٦-١)$$

$$\left.\begin{aligned} E &= 60\pi \frac{I_{/A} \cdot l_{eff.T/m}}{r_{/Km} \cdot \lambda_{/m}} \quad [mV/m] \\ H &= 0.5 \frac{I_{/A} \cdot l_{eff.T/m}}{r_{/Km} \cdot \lambda_{/m}} \quad [mA/m] \end{aligned}\right\} \quad \text{أكبر شدة حقل بعيد تنجم عن إشعاع هوائي ديبول}$$

حيث E و H القيمة الفعالة لشدة الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي، I القيمة الفعالة لتيار هوائي الإرسال، r المسافة بين هوائي الإرسال وهوائي الاستقبال، λ طول الموجة، $h_{eff.T}$ و $l_{eff.T}$ الارتفاع الفعال لهوائي الإرسال العمودي والطول الفعال لهوائي الإرسال الديبول.

إذا وضعنا في منطقة الاستقبال وباتجاه خطوط الحقل الكهربائي هوائي عمودي ارتفاعه الفعال $h_{eff.R}$ ، تنشأ بين نهايتيه قوة محركة كهربائية، أي ينشأ على مخرجه جهد الدارة المفتوحة (جهد اللاحمل) قيمته:

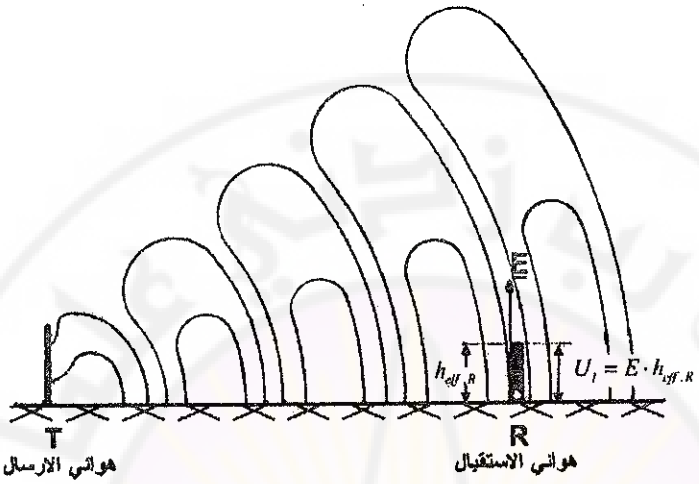
$$U_l = E \cdot h_{eff.R} \qquad (٦-٣)$$

وتجدر الإشارة هنا إلى أنه يمكن اعتبار خطوط الحقل الكهربائي على مسافة كبيرة بما فيه الكفاية من جهاز الإرسال موجودة في جبهة أمواج مستوية قادمة من هوائي الإرسال.

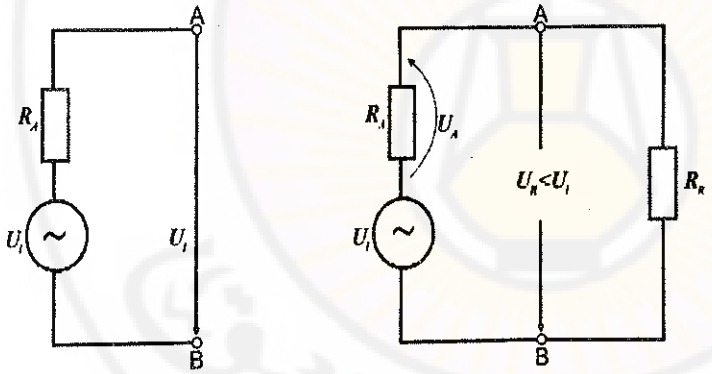
يمكن قياس جهد اللاحمل U_l على مخرج هوائي الاستقبال فقط عندما لا يسحب من الهوائي تيار.

عند تحميل الهوائي بممانعة مدخل جهاز الاستقبال $\underline{Z}_R$ يسري في الهوائي تيار تحدد قيمته

بممانعة الهوائي $\underline{Z}_A$ وممانعة الحمل $\underline{Z}_R$. بذلك تنقص قيمة الجهد على مأخذي الهوائي عن قيمة جهد اللاحمل بمقدار ما، كما هي الحال في كل مولد ذي مقاومة داخلية R_A تم تحميله بمقاومة R_R (أنظر الشكل ٦-٢).



الشكل ٦-١ : جهد اللاحمل (جهد الدارة المفتوحة) لهوائي استقبال



الشكل ٦-٢ : تحميل مولد عادي بمقاومة R_R

حالة التوافق عندما تكون $R_A = R_R$ أي

$$U_A = U_R = \frac{U_l}{2}$$

عندها تستهلك نصف الاستطاعة المسحوبة من المولد في R_A والنصف الآخر في R_R .

يختلف توزع التيار على هوائي الاستقبال نوعاً ما عن توزع التيار على هوائي الإرسال، نظراً لأنه لا يغذى بالتيار في أسفله. ويعمل هوائي الاستقبال بقوة محركة كهربائية EMF موزعة على امتداد سلكه، حيث يأخذ كل موضع من سلكه قدرة من الحقل الكهرطيسي.

من المهم جداً معرفة أن أي هوائي استقبال يسري فيه تيار يعمل بنفس الوقت كهوائي إرسال ويشع جزء من القدرة التي استقبلها في الجو المحيط به. وتكون القدرة المعاد إشعاعها أكبر كلما كبرت شدة التيار في هوائي الاستقبال. ويغير بذلك هوائي الاستقبال الحقل المشع من

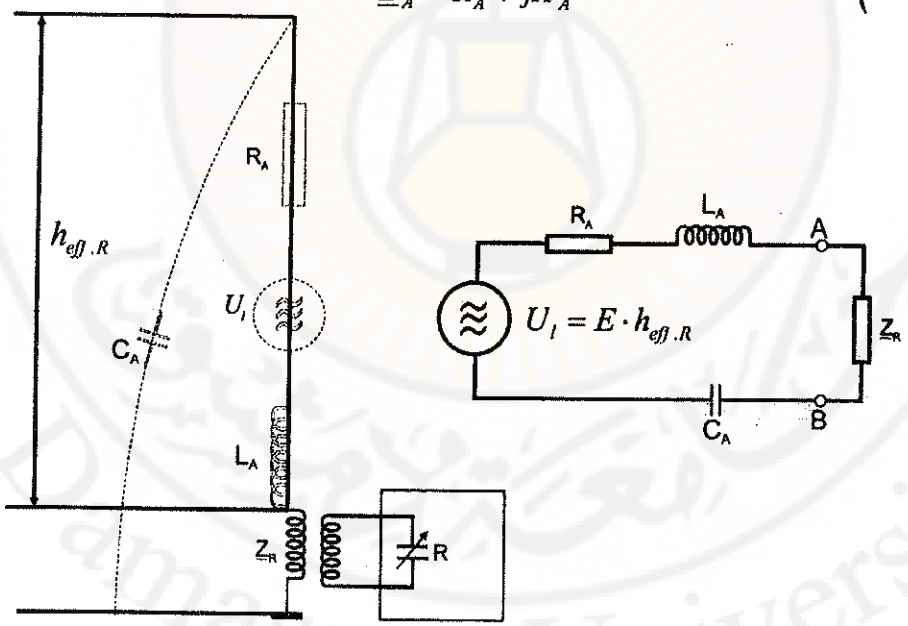
هوائي الإرسال والموجود في الجو المحيط به. ويضعف هوائي الاستقبال الحقل المشع من هوائي الإرسال بمقدار القيمة المطلقة للقدرة التي يعطيها إلى جهاز الاستقبال. وتبين المعالجة الدقيقة أنه في أحسن الظروف، كما هي الحال في أي مولد آخر (أنظر الشكل ٦-٢)، يعطي هوائي الاستقبال 50% فقط من القدرة المأخوذة من الحقل الكهرطيسي إلى جهاز الاستقبال كقدرة مفيدة. ويستهلك هوائي الاستقبال نفسه الـ 50% الأخرى في مقاومته الإشعاعية (بفرض أن $R_V = 0$)، أي أنه يعيد إشعاعها في الجو المحيط به. وتؤدي المقاومة الإشعاعية لهوائي الاستقبال دوراً أساسياً في تحويل هذه القدرة الكهربائية إلى قدرة كهرطيسية مرة أخرى.

أفضل طريقة لتحديد سلوك هوائي الاستقبال في ظروف تشغيله المختلفة هي وضع دارة مكافئة له (الشكل ٦-٣). ويمثل الهوائي في الدارة المكافئة بمولد ذي قوة محركة كهربائية EMF أو جهد اللاحمل

$$U_l = E \cdot h_{eff.R} \qquad (٦-٤)$$

ومقاومة داخلية

$$\underline{Z}_A = R_A + jX_A \qquad (٦-٥)$$



الشكل ٦-٣ : هوائي الاستقبال ودارته المكافئة

وتتألف R_A من المقاومة الإشعاعية R_S ومقاومة الضياع R_V للهوائي. كما تتشكل X_A من تحريض الهوائي L_A وسعة الهوائي C_A .

يحمل الهوائي بممانعة مدخل جهاز الاستقبال.

$$\underline{Z}_R = R_R + jX_R \qquad (٦-٦)$$

ويجب تحقق الشروط التالية حتى يتمكن هوائي الاستقبال من أخذ أكبر قدرة ممكنة من الحقل الكهرطيسي الموجود في الجو المحيط به وتقديمها إلى جهاز الاستقبال:

١- يجب جعل الارتفاع الفعال للهوائي أكبر ما يمكن، بذلك تصبح U_l أكبر ما يمكن (المعادلة ٦-٤).

٢- يجب نصب الهوائي بحيث يتطابق اتجاه سلكه مع اتجاه خطوط الحقل الكهربائي. أما إذا كانت هناك زاوية α بين سلك الهوائي والشعاع $\underline{E}$ فينخفض جهد اللاحمل ويصبح :

$$U_l = E \cdot h_{eff.R} \cdot \cos\alpha \qquad (٦-٧)$$

٣- يجب موافقة المركبة التخيلية لممانعة الهوائي X_A مع المركبة التخيلية لممانعة جهاز الاستقبال X_R على التردد المراد استعماله. أي يجب أن تكون:

$$X_A + X_R = 0 \rightarrow \quad X_A = -X_R \qquad (٦-٨)$$

عندها تعمل دارة مدخل جهاز الاستقبال في حالة طنين بأكبر جهود وتيارات ممكنه، وتكون ممانعتها الكلية مقاومة حقيقية فقط.

٤- يجب موافقة المركبة الحقيقية لممانعة مدخل الهوائي R_A مع المركبة الحقيقية لممانعة مدخل جهاز الاستقبال R_R ، أي يجب أن تكون :

$$R_A = R_R \qquad (٦-٩)$$

بذلك تكون قيمة الاستطاعة المعطاة من الهوائي إلى جهاز الاستقبال في حالة التعيير والتوافق المشار إليهما أعلاه.

$$P_{opt.} = \frac{(U_l/2)^2}{R_A} = \frac{E^2 \cdot h_{eff.R}}{4(R_S + R_V)} \qquad (٦-١٠)$$

حيث E هي القيمة الفعالة لشدة الحقل الكهربائي. بإهمال الضياع تصبح هذه المعادلة:

$$P_{opt.} = \frac{E_{eff}^2 \cdot h_{eff.R}^2}{4R_S} \qquad (٦-١١)$$

٦-٢ الهوائي الديبول المطوي (Folded Dipole Antenna)

تبين نتيجة الخبرة العملية أن الأمواج القصيرة جداً المستقطبة أفقياً تنتشر بشكل أفضل ويمكن استقبالها بدون تشويش. لذلك تركب هوائيات الأمواج القصيرة جداً عادة، بما فيها الديبول المطوي، في طرفي الإرسال والاستقبال بشكل أفقي.

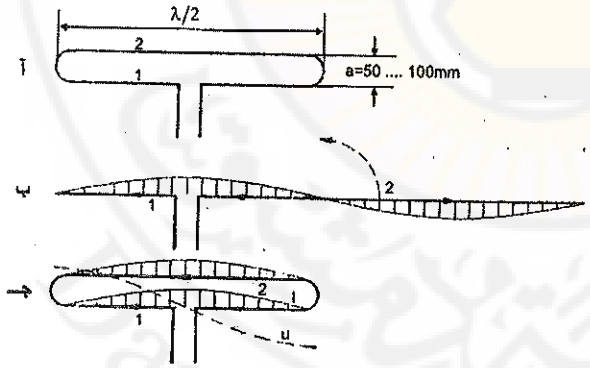
تمتلك الديبولات البسيطة التي تمت مناقشتها حتى الآن في حالة التعيير مقاومة مدخل بحدود 73 Ω . ومن الأنسب من وجهة النظر التقنية توصيل الديبولات المتناظرة مع جهاز الاستقبال بواسطة نواقل تردد عالي متناظرة. إلا أنه لا يوجد عملياً نواقل مضاعفة متناظرة مقاومتها المميزة Z_L تقع بحدود 70 Ω. وتقع كل قيم المقاومات المميزة للنواقل المضاعفة المتناظرة فوق القيمة 120 Ω .

تمتلك النواقل المحورية غير المتناظرة قيم مقاومة مميزة مناسبة، إلا أنه لا يمكن وصلها بالهوائي الديبول مباشرة، بل هناك حاجة إلى عنصر تناظر يوضع بين الناقل المحوري غير المتناظر ومدخل الديبول المتناظر.

يقدم الديبول المطوي حلاً مناسباً لهذه المشكلة إذ يمتلك مقاومة مدخل قيمتها نحو 300 Ω. لذلك يمكن وصله مباشرة مع ناقل تردد عالٍ متناظر مقاومته المميزة 300 Ω .

تتكون النواقل المتناظرة التي تقع مقاومتها المميزة في المجال 240Ω-300Ω من شريط مسطح مرن مصنوع من مادة عازلة عالية الجودة طمر في طرفيه سلكان متوازيان المسافة بينهما ثابته. ويتم إنتاج هذه النواقل بطرق تكنولوجية خاصة.

ينشأ الديبول المطوي، كما يتضح من الشكل (٦-٤)، نتيجة طي الطرف الطويل لديبول عادي بطول λ مغذى خارج المنتصف وعلى بعد $\lambda/4$ من نهايته اليسرى. وتوصل نهاية الطرف الطويل بعد ثنيه على بعد $\lambda/2$ من نهايته اليمنى بالنهاية اليسرى للديبول. ويمكن إجراء ذلك نظراً لأن قيمة التيار في كلتا نهايتي



الشكل ٦-٤ :هوائي ديبول مطوي

آ- مقاييسه ب- نشوءه من ديبول بطول λ مغذى بالتيار خارج المنتصف جـ - توزع الجهد والتيار عليه .

الديبول الموصولتين الواحدة مع الأخرى تساوي الصفر، ولأن كلتا النهايتين تمتلكان نفس الكمون الكهربائي . بذلك يساوي الطول الفراغي للديبول المطوي نصف طول الموجة . ويجب أن تكون المسافة بين طرفي الديبول العلوي والسفلي صغيرة بالنسبة لطول الموجة المستخدمة .

لتوضيح سبب ازدياد مقاومة مدخل الديبول المطوي إلى 300Ω نفترض أن الديبول المطوي هو هوائي إرسال . عند تحريضه بموجته الأساسية ينشأ عند نقطتي تغذيته بطن تيار وعند نهايتيه النحيلتين عقدة تيار وبطن جهد (الشكل ٦-٤-جـ)، كما هي الحال في الديبول العادي. وتنشأ أيضاً قيمة عظمى للتيار في منتصف السلك المطوي 2 ، أي مقابل نقطتي التغذية تماماً.

يهتز التيار في السلك ٢ بطور معاكس لطور التيار في السلك ١ (الشكل ٦-٤-ب). إلا أن طي السلك ٢ ينجم عنه أن كلا التيارين في الطرفين العلوي والسفلي للديبول المطوي يؤازر الواحد الآخر في الإشعاع خارج الهوائي، كما يبين الانتقال من الشكل ب إلى الشكل جـ. بذلك تحدد شدة الحقل والاستطاعة المشعة بضعف قيمة التيار في موضع التغذية I وليس بقيمته العادية. وتتناسب الاستطاعة المشعة من الهوائي الديبول بموجب المعادلة (٣-٢) مع مربع شدة التيار. وهذا يعني أن الاستطاعة المشعة من الديبول المطوي تساوي أربعة أضعاف الاستطاعة المشعة من الديبول العادي ولنفس شدة تيار التغذية في كلتا الحالتين .

إن المقاومة الإشعاعية بموجب المعادلة $P_S = R_S I^2$ تساوي إلى الاستطاعة الكلية المشعة من الهوائي مقسومة على مربع تيار التغذية I^2 الذي يأخذه الهوائي من جهاز الإرسال. وهذا يعني أن المقاومة الإشعاعية للديبول المطوي يجب أن تساوي أربعة أضعاف المقاومة الإشعاعية للديبول العادي، أي بحدود 300Ω ، نظراً لأن :

للديبول العادي $P_{S1} = R_S I^2$

للديبول المطوي $P_{S2} = R_S (2I)^2 = 4R_S I^2$

$$P_{S2} = 4P_{S1}$$

حيث I تيار التغذية لكلا الهوائيين ، $2I$ التيار المؤثر في الديبول المطوي، R_S المقاومة الإشعاعية للديبول العادي ، $4R_S$ المقاومة الإشعاعية للديبول المطوي .

يسبب قرب السلك ١ من السلك ٢ في الديبول المطوي انخفاض المقاومة الإشعاعية للسلك ١ من $R_S = 73\Omega$ إلى قيمة تقع في المجال $R_S = 60...65\Omega$. بذلك تنقص المقاومة

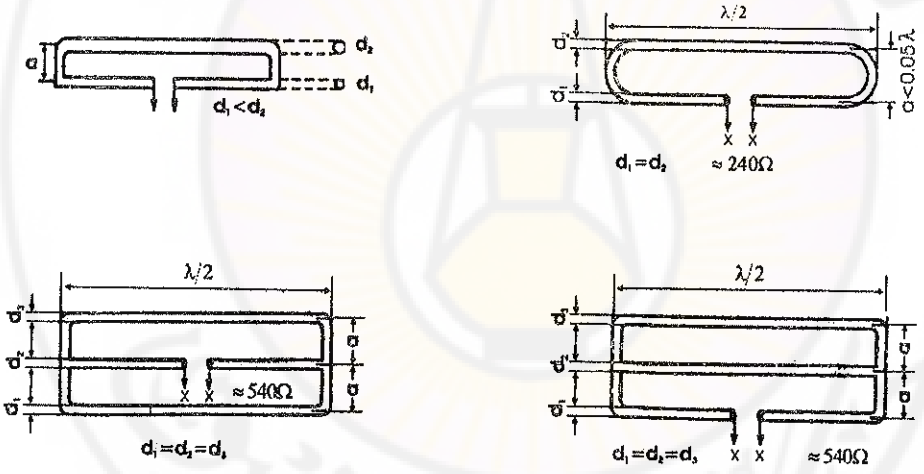
الإشعاعية للديبول المطوي إلى قيمة تقع في المجال 240....260Ω . ولا تتعلق القيمة الدقيقة لمقاومة الديبول المطوي الإشعاعية بالمسافة بين السلكين a .أما إذا صنع الديبول المطوي من سلكين ١و٢ بقطرين مختلفين عندها تتعلق مقاومته الإشعاعية بالمسافة a وبنسبة القطرين .

تمثل المقاومة الإشعاعية Rs في الديبول المعير عديم الضياع بأن واحد مقاومة مدخل الديبول ، بذلك تكون مقاومة مدخل الديبول المطوي المعير عديم الضياع نحو 240Ω .

المخطط الإشعاعي للديبول المطوي هو نفس المخطط الإشعاعي للديبول العادي نظراً لأنّ التيارين في السلكين ١و٢ نفس الاتجاه .

يتميز الديبول المطوي عن الديبول العادي بما يلي :

- إمكانية موافقته مع الناقل المضاعف المتناظر .
- منحني طنينه أعرض من منحني طنين الديبول العادي . ذلك يعني أنه يمتلك خاصة المجال الترددي العريض . رسمت في الشكل (٦-٥) أشكال الديبولات المطوية المستخدمة في الحياة العملية .



الشكل ٦-٥ : أشكال الديبولات المطوية المستخدمة في الحياة العملية

٦-٣ الهوائي الإطاري Loop Antenna

يتألف الهوائي الإطاري من عدة لفات سلكية مربعة أو معينة أو مستديرة الشكل. توصل نهايتي هذه اللفات مباشرة بمكثف متبدل قابل للتعيير (الشكل ٦-٦). ويعمل الهوائي الإطاري كملف مسطح تولد فيه المركبة المغناطيسية للحقل الكهرطيسي $\underline{H}$ جهد U_i إذا كانت مقاييسه

صغيرة بالنسبة لطول الموجة. ويمكن تعبير الهوائي الإطاري مع المكثف المتبدل على تردد الاهتزاز المراد استقباله.

للهوائي الإطاري صفات توجيهية واضحة. عندما يتطابق مستوي الإطار مع اتجاه انتشار الأمواج الكهرطيسية x (الشكل ٦-٦-أ) تخترق خطوط الحقل المغناطيسي $\underline{H}$ أو خطوط التحريض $\underline{B}$ سطح الملف بشكل عمودي وتولد فيه جهداً أعظمياً. وعندما يكون مستوي الإطار بعكس ذلك عمودياً على اتجاه الانتشار x ومتجهاً باتجاه $\underline{H}$ فلا يتولد فيه أي جهد. وعندما يشكل مستوي الإطار مع اتجاه ورود جبهة الأمواج زاوية ما α (الشكل ٦-٦-ب) يحدد الجهد المتولد $e = U_i$ بموجب قانون تجيبي يمكن كتابته بالشكل التالي:

$$\left.\begin{aligned} \hat{U}_i &= \omega \cdot W \cdot \hat{\Phi} \cdot \cos\alpha = \omega \cdot W \cdot F \cdot \hat{B} \cdot \cos\alpha \\ \hat{U}_i &= \omega \cdot W \cdot F \cdot \mu \cdot \hat{H} \cdot \cos\alpha \end{aligned}\right\} \qquad (٦-١٢)$$

وعندما يتم انتشار الأمواج الكهرطيسية في الهواء حيث $\mu_r = 1$ ، أي $\mu = \mu_0$ تصبح المعادلة (٦-١٢) :

$$\hat{U}_i = \omega \cdot W \cdot F \cdot \mu_0 \cdot \hat{H} \cdot \cos\alpha \qquad (٦-١٣)$$

تم في الجزء الأول من الكتاب اشتقاق العلاقة التالية بين شدة الحقل الكهربائي وشدة الحقل المغناطيسي :

$$\frac{E}{H} = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

بتعويض هذه العلاقة في المعادلة (٦-١٣) نحصل :

$$\hat{U}_i = \omega \cdot W \cdot F \cdot \mu_0 \cdot \hat{E}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

$$\hat{U}_i = 2\pi \cdot f \cdot W \cdot F \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}\,\hat{E}\cos\alpha$$

وبما أن $\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = c$ و $F = b \cdot h$ يصبح شكل هذه المعادلة :

$$\hat{U}_i = 2\pi \cdot W \cdot b \cdot h \frac{f}{c}\hat{E}\cos\alpha$$

بتعويض $\frac{f}{c} = \frac{1}{\lambda}$ و الانتقال من القيم العظمى إلى القيم الفعالة نحصل :

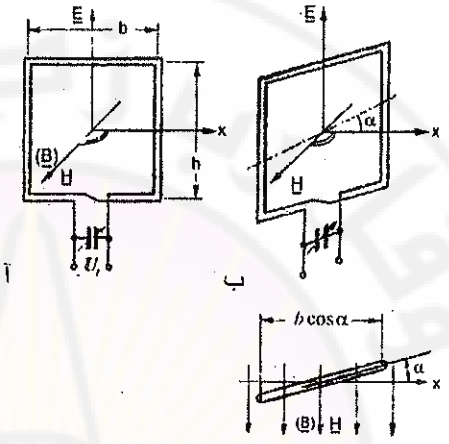
$$U_i = 2\pi \cdot W \cdot b \cdot \frac{h}{\lambda} E\cos\alpha \qquad (٦-١٤)$$

يمكن اعتبار القيم قبل الحد $E\cos\alpha$ في هذه المعادلة الارتفاع الفعال للهوائي الإطاري h_{eff}.
بذلك يكون جهد اللاحمل (جهد الدارة المفتوحة) عند مأخذي الهوائي .

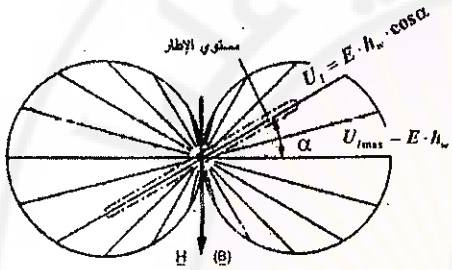
$$U_l = E \cdot h_{eff} . \cos\alpha \qquad (١٥-٦)$$

حيث:

$$h_{eff} = \frac{2\pi \cdot W \cdot b \cdot h}{\lambda} \qquad (١٦-٦)$$



الشكل (٦-٦): الهوائي الإطاري لحساب جهد الإطار من شدة الحقل المغناطيسي $\underline{H}$



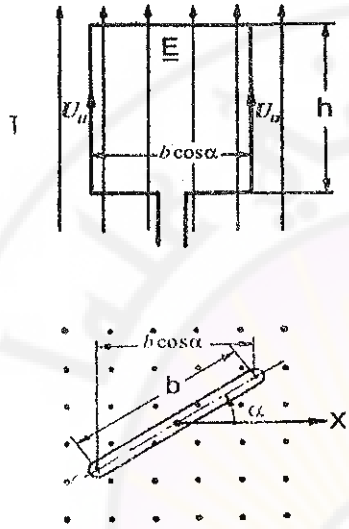
الشكل (٦-٧) : المخطط الإشعاعي للهوائي الإطاري في المستوي الأفقي

يبين الشكل (٦-٧) المخطط الإشعاعي للهوائي الإطاري في المستوي الأفقي والناجم عن العلاقة التجيبية، وهو على شكل دائرتين متماستين. والشرط الأساسي لنشوء المخطط الإشعاعي بهذا الشكل هو أن تكون مقاييس الإطار صغيرة بالنسبة لطول الموجة.

من الخطأ التصور بأن الهوائي الإطاري يتأثر فقط بمركبة الحقل المغناطيسي $\underline{H}$ وأن الهوائي العمودي يتأثر فقط بمركبة الحقل الكهربائي $\underline{E}$ للحقل الكهرطيسي. كل ما في الأمر هو أنه من الأسهل توضيح طريقة عمل الهوائي العمودي باستخدام مركبة الحقل الكهربائي وتوضيح طريقة عمل الهوائي الإطاري باستخدام مركبة الحقل المغناطيسي. لتوضيح ذلك نحسب فيما يلي جهد الإطار مرة أخرى باستخدام مركبة الحقل الكهربائي $\underline{E}$.

نفترض الآن أن الموجة المشعة من جهاز الإرسال تأتي إلى الهوائي الإطاري عندما يكون اتجاه طرفه h باتجاه $\underline{E}$. ونفترض أن مستوي الإطار يصنع مع اتجاه الانتشار x الزاوية α (الشكل ٦-٨). في هذا الوضع للهوائي وعندما يكون الحقل الكهربائي عمودياً، ينشأ في

طرفي الإطار العموديين قوتين محركتين كهربائيتين . ولا ينشأ في طرفي الإطار الأفقيين أية قوة محركة كهربائية. ويمكن اعتبار القيمتين المطلقتين لجهدي الدارة المفتوحة الناشئين في الجزءين العموديين $\underline{U}_{l1}$ و $\underline{U}_{l2}$ متساويين، نظراً لأن $|\underline{E}|$ لا تتغير عملياً خلال المسافة من الطرف العمودي ١ إلى الطرف العمودي ٢ . ولكن تمتلك $\underline{U}_{l1}$ و $\underline{U}_{l2}$ زاويتي طور مختلفتين. وبالرغم من أن لهذين الجهدين اتجاهين متعاكسين (الشكل آ). إلا أنهما لا يعدمان بعضهما كلياً عند نقطتي مدخل الإطار. وينتج الجهدان $\underline{U}_{l1}$ و $\underline{U}_{l2}$ عند مدخل الإطار جهداً صغيراً $\underline{U}_l$ يساوي إلى حاصل طرحهما الشعاعي. ويمكن حساب قيمة المطلقة لهذا الجهد بمساعدة الشكلين (ب) و (جـ).



الشكل (٦-٨) : لحساب جهد الإطار من شدة الحقل الكهربائي $\underline{E}$

نحسب أولاً زاوية الطور ψ بين $\underline{U}_{l1}$ و $\underline{U}_{l2}$. ونحصل عليها من الفرق في طول الطريق $b\cos\alpha$ وطول الموجة λ. ويمكن كتابة العلاقة التالية بين هاتين القيمتين :

$$\frac{\psi}{b\cos\alpha}=\frac{2\pi}{\lambda}$$

ومنه:

$$\psi=\frac{2\pi\cdot b\cdot\cos\alpha}{\lambda} \qquad (٦-١٧)$$

بمساعدة العلاقة المثلثية نحصل من قيمة ψ هذه وبمساعدة الشكل (جـ) على القيمة المطلقة لمحصلة جهد الإطار $\underline{U}_l$ حيث $\underline{U}_l=\underline{U}_{l1}-\underline{U}_{l2}$.

$$U_l = 2U_{ll}\sin\frac{\psi}{2} \qquad (٦-١٨)$$

عندما تكون مقاييس الإطار صغيرة بالنسبة لطول الموجة، كما اشترط سابقا، تكون الزاوية ψ زاوية صغيرة بحيث يمكن استبدال جيب الزاوية بقوسها. بذلك تصبح المعادلة (٦-١٨) بعد تعويض المعادلة (٦-١٧) وتعويض $U_{ll} = E \cdot h$ بالشكل التالي:

$$U_l \approx 2U_{ll}\frac{\psi}{2} = E \cdot h\frac{2\pi \cdot b \cdot \cos\alpha}{\lambda} \qquad (٦-١٩)$$

وعندما يكون الإطار مؤلفاً منW لفة بدلاً من لفة واحدة، يتضاعف الجهد W مرة، وتصبح المعادلة(٦-١٩):

$$U_l = E\frac{2\pi \cdot W \cdot b \cdot h}{\lambda}\cos\alpha \qquad (٦-٢٠)$$

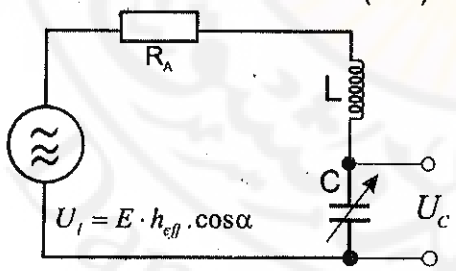
وهي نفس المعادلة التي تم اشتقاقها فيما سبق إنطلاقاً من الحقل المغناطيسي المتناوب (المعادلتين ٦-١٥ و ٦-١٦).

الارتفاع الفعال للهوائي الإطاري صغير جداً بالمقارنة مع الارتفاع الفعال لهوائي خطي. على سبيل المثال يكون الارتفاع الفعال لإطار مربع طول ضلعه 1 m وعدد لفاته ٥ لفات عند العمل على موجة طولها λ=300m(المعادلة ٦-١٦).

$$h_{eff} = \frac{2\pi \cdot W \cdot b \cdot h}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 100^2\left[cm^2\right]}{30000[cm]} = 10.5cm$$

وهو ارتفاع ضئيل جداً. لذلك يكون الجهد المقدم من الإطار U_l صغيراً جداً.

ولكن بما أن الإطار يؤثر كتحريض عندما تكون مقاييسه صغيرة بالمقارنة مع طول الموجة، يمكن وصله بمكثف متبدل كما هو مبين في الشكل (٦-٩).



الشكل ٦-٩ :.الدارة المكافئة لهوائي إطاري معير

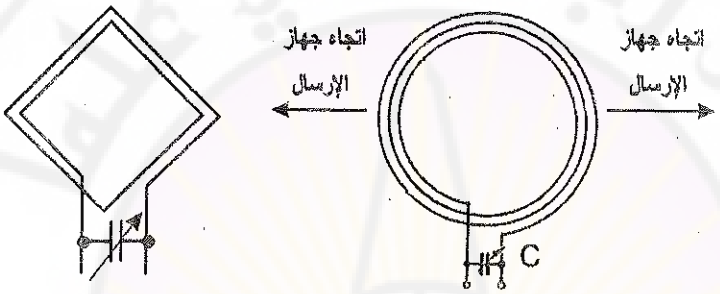
ويمكن تعييرهما بسهولة بحيث يهتزان في حالة طنين. ويكون الجهد على طرفي المكثف في هذه الحالة أكبر من الجهد المتولد بمقدار جودة طنين الدارة ρ . ويجب الانتباه هنا إلى أن الدارة المكافئة للإطار والمكثف هي دارة طنين تسلسلية وليست دارة طنين تفرعية.

وواضح من الشكل (٦-٩) أن المولد المغذي بالجهد U_1 يقع على التسلسل مع L و C ، وليس على التفرع.

من النادر استعمال الهوائي الإطاري كهوائي إرسال بسبب ارتفاعه الفعال الصغير وبالتالي ضآلة الاستطاعة التي يشعها. يقابل هذه السيئة ميزة مهمة وهي استقباله الخالي من التشويش بسبب علاقة شدة الإشارة المستقبلة باتجاه الإطار.

يستعمل الهوائي الإطاري بالدرجة الأولى في تقنية تحديد الاتجاه (direction-finder).

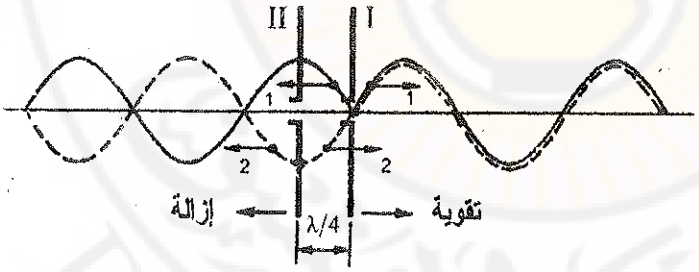
يبين الشكل (٦-١٠) شكلين آخرين للهوائي الإطاري وهما الهوائي الإطاري الدائري والهوائي الإطاري المعين.



الشكل ٦-١٠ : الهوائي الإطاري الدائري والهوائي الإطاري المعين

٦-٤ الهوائيات ذات العواكس والموجهات

نغذي هوائي ديبول I بتيار، ونغذي هوائي ديبول II، يبعد عن الديبول I بمقدار $\lambda/4$ ، بتيار له نفس الشدة ولكن يختلف عن تيار الديبول I في زاوية الطور بمقدار 90° (الشكل٦-١١).

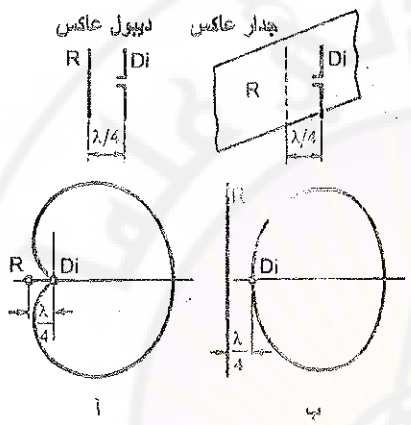


الشكل ٦-١١ : تراكم حقلين كهرطيسيين لديبولين المسافة بينهما λ/4 تتم تغذيتهما بتيارين مختلفين في زاوية الطور بمقدار 90° .

في حالة التغذية المبينة في الشكل يشع الهوائي I الاهتزاز المرسوم بخط مستمر1، ويشع الهوائي II الاهتزاز المرسوم بخط متقطع2 والمختلف عن الاهتزاز 1 في زاوية الطور بمقدار 90°. يتراكم حقل الهوائي II مع حقل الهوائي I بحيث ينجمعان باتجاه اليمين ويزيل الواحد الآخر بعضهما في اتجاه اليسار.

وتنشأ بذلك خاصة توجيهية لهذا النظام من الهوائيات، ويكون مخططه الإشعاعي منحنياً بشكل القلب (Cardioid-curve) (الشكل٦-١٢-أ)

نتوصل إلى نتيجة مشابهة إذا غذينا هوائي واحد فقط بحيث يتحرض الهوائي الثاني على الاهتزاز بتأثير حقل الهوائي الأول. يسمى الهوائي الأول Di "الهوائي الابتائي" أو "المشع الرئيسي"، ويسمى الهوائي المحرض على الاهتزاز R "الهوائي العاكس" أو "المشع الثانوي" (Reflector) المترابط إشعاعيا مع الهوائي الابتدائي (الشكل ٦-١٢-أ).



الشكل ٦-١٢ : المخطط الإشعاعي لديبول مع عاكس.
أ - العاكس سلك معدني
ب- العاكس جدار معدني مصمت أو شبكي

يولد حقل الهوائي الابتدائي $\underline{E}_1$ في الهوائي العاكس تياراً شدته I_2 . وإذا كان الهوائي العاكس معيراً بطول$\lambda/2$ تكون القيمة المطلقة لتياره I_2 مساوية إلى القيمة المطلقة لتيار المشع الابتدائي I_1 . وينتج التيار حقلاً $\underline{E}_2$ يتأخر بالتقريب الاول 180° عن الحقل الابتدائي $\underline{E}_1$. سبب ذلك هو أنه في حالة الهوائي العاكس المعير يتأخر التيار في الجزء التحريضي من دارة طنينه والموجود في منتصفه بمقدار 90° عن الجهد الناشئ في الجزء السعوي من دارة طنينه والموجود بين نهايتيه.

ويولد الحقل المغناطيسي المتفق مع التيار في زاوية الطور بعد ربع دورة، أي بعد 90° أخرى حقلاً كهربائياً $\underline{E}_2$. بذلك يتأخر الحقل الكهربائي الثانوي المتولد $\underline{E}_2$ عن الحقل الكهربائي الابتدائي المحرض والموجود جوار العاكس $\underline{E}_1$ بمقدار 180°. إذا راعينا أن الإشعاع من الهوائي الابتدائي يحتاج إلى زمن يساوي ربع دورة، أو بالدرجات 90° ، حتى يقطع الطريق من الهوائي الابتدائي إلى الهوائي العاكس وطوله $\lambda/4$ ، نرى أن الحقل الثانوي الناشئ من العاكس $\underline{E}_2$ يتأخر عن الحقل الابتدائي المتشكل في نفس اللحظة الزمنية في المشع الرئيسي بما مجموعه 270° . عند وصول الحقل $\underline{E}_2$، نتيجة انتشاره في جميع الاتجاهات، إلى الهوائي الابتدائي بعد ربع دورة أخرى، أي بعد 90° أخرى، يكون هذا الحقل قد تأخر عن الحقل الابتدائي المتشكل في نفس اللحظة بما مجموعه 360° . بذلك يؤازر

الحقلان الابتدائي والثانوي المتفقان في زاوية الطور الواحد الآخر باستمرار ابتداءً من موضع الهوائي الابتدائي وباتجاه اليمين مشكلين حقلاً تساوي شدته ضعف شدة الحقل الابتدائي (الشكل ٦-١١). وتجدر الإشارة هنا إلى أن الهوائي العاكس هو هوائي ديبول مقصور في منتصفه، لذلك لا يستهلك أي استطاعة ويشع كامل الاستطاعة التي يستقبلها مرة أخرى .

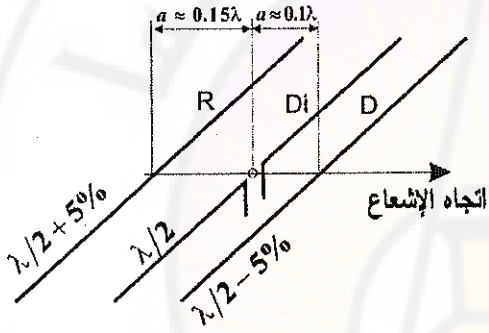
انطلاقاً من الهوائي العاكس وباتجاه اليسار يزيل الحقلان الابتدائي والثانوي بعضهما بعضاً كلياً بسبب اختلاف زاوية طور الحقل $\underline{E}_2$ عن زاوية طور الحقل $\underline{E}_1$ بمقدار180.

ويجب الانتباه هنا إلى أن الحلقين الكهربائيين يزيل الواحد الآخر تماماً فقط على امتداد الخط الواصل بين Di وR باتجاه اليسار(أنظر الشكل ٦-١٢). في الاتجاهات الأخرى التي تصنع زاوية ما مع هذا الخط يوجد إشعاع ضعيف كما يتبين من المخطط الإشعاعي المرسوم في الشكل (٦-١٢-آ). وإذا أريد منع هذا الإشعاع أيضاً وجب استعمال عاكس على شكل جدار سطحه كبير ومصنوع من صفيحة معدنية مستوية مصمتة أو من شبك سلكي مستوي. كما يجب أن يمتد السطح العاكس في كل الاتجاهات بمقدار $\lambda/2$ على الأقل زيادة عن مقاييس الهوائي . في حالة صنع العاكس من شبك معدني يجب أن لا تزيد أبعاد فتحات الشبك على $0{,}005\lambda$.

يشترط لصحة الأفكار السابقة حول انعدام الإشعاع في الاتجاه الخلفي ومضاعفته في الاتجاه الأمامي لنظام الهوائي أن تكون القيمة المطلقة للتيار المتولد في العاكس والحقل الناجم عنه مساويين تماماً لتيار وحقل المشع الابتدائي، وأن يكون بالإضافة إلى ذلك هناك قفزة في زاوية الطور خلال الانعكاس مقدارها 180° تماماً. ولا يتحقق في الواقع كلا الشرطين بسبب الضياعات التي لا يمكن التغلب عليها في الهوائي العاكس. لذلك لا يمكن في حالة وجود سلك عاكس واحد أن ينعدم الحقل انعداماً كاملاً في الاتجاه الخلفي وأن تتضاعف شدة الحقل تماماً في الاتجاه الأمامي. ولا يمكن تحقيق ذلك إذا غيرنا طول العاكس وغيرنا بعده عن المشع الابتدائي تغييراً ضئيلاً. ويمكن التوصل إلى الوضع الأنسب لشدة الإشعاع الرئيسي وشدة الإشعاع العكسي بتغيير حاذق في طول العاكس وفي المسافة بينه وبين المشع الابتدائي. أظهرت التجارب العملية أنه يمكن التوصل إلى حل وسط مناسب بين ربح الهوائي ونسبة الإشعاع الأمامي إلى الإشعاع العكسي إذا جعلنا بعد العاكس عن المشع الرئيسي 0.2λ وجعلنا طوله % 5....6 أكبر من $\lambda/2$. من البديهي أن يؤثر سلك العاكس الموجود على بعد $\lambda/4$ أو أقل من المشع الابتدائي على مقاومة مدخل نظام الهوائي. ويؤثر السلك العاكس كديبول

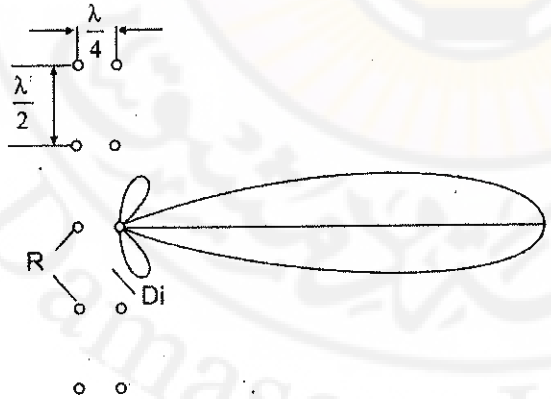
مقصور عند نقطتي تغذيته. ويكافئ المشع والعاكس معاً محول نسبة تحويله 1 : 1. وكما يعمل قصر الطرف الثانوي للمحول على إنقاص مقاومة مدخل طرفه الابتدائي، ينقص السلك العاكس المقصور في الوسط مقاومة مدخل الديبول المشع الابتدائي. وعلى سبيل المثال عندما يكون البعد بين الهوائي الابتدائي والعاكس $0.2\ \lambda$ تصبح المقاومة الإشعاعية R_S نحو $42\ \Omega$. من الشيق معرفة أنه لطول مشع ثانوي محدد يقع في المجال $l = (0.43....0.45)\lambda$ ولمسافة محددة بين المشع الرئيسي والمشع الثانوي $a \approx 0.1\ \lambda$ لا يحدث انعدام للحقل بالاتجاه من المشع الرئيسي إلى المشع الثانوي وما بعده، بل على العكس تحدث تقوية لشدة الإشعاع. هنا يتم الحديث عن التأثير التوجيهي للمشع الثانوي ويسمى المشع الثانوي في هذه الحالة "موجه الموجة"(*wave director*). بتجميع ديبول مع عاكس وموجه ينشأ هوائي ياغي الشهير (*yagi antenna*) .

يبين الشكل (٦-١٣) شكل هذا الهوائي مع الإشارة إلى أن الأطوال والأبعاد المدرجة في الشكل ليست سارية المفعول بشكل عام ويمكن تغييرها حسب الخاصة التوجيهية المرغوب بها للهوائي.



الشكل ٦-١٣ : هوائي ياغي مكون من الديبول المغذى *Di* وعاكس *R* وموجه *D*

إذا وضعنا عدداً من نظام الناقلين المبين في الشكل (٦-١٢-آ) الواحد بجانب الآخر كما هو مبين في الشكل (٦-١٤) نحصل على نظام هوائي درجة توجيهه عالية جداً. ويتكون المخطط الإشعاعي لهذا النظام بالدرجة الأولى من لفة رئيسية ضيقة على طرف واحد من الهوائي. ويبين الشكل (٦-١٤) نظام هوائي مكوناً من خمسة ديبولات وخمسة عواكس ومخططه الإشعاعي.



الشكل ٦-١٤ : المخطط الإشعاعي لخمسة هوائيات مكون كل منها من ديبول وعاكس. الديبولات الخمسة محرضة بنفس زاوية الطور


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

المصطلحات العلمية

انكليزي	عربي
A	
Abscissa	الاحداثي الأفقي
Absorption	الامتصاص
Admittance	السماحية
Amplitude	مطال
Angle	زاوية
Antenna	هوائي
Atmosphere	الغلاف الجوي
Atmospherics	الظواهر الجوية
Alternative	متناوب
Attenuation	التخميد أو التخامد
Attenuation constant	ثابت التخامد
Attenuation factor	عامل التخامد
Axis	محور
B	
Band	مجال
Backward wave	الموجة المرتدة
Broadband	مجال عريض
Bandwidth	عرض المجال
Beam width	عرض الحزمة
C	
Calculation	حساب
Capacitance	المكثف

Capture area	السطح الفعال
Characteristic	مميزة
Characteristic impedance	الممانعة المميزة
Circular	دائري
Coefficient	معامل
Coefficient of reflection	معامل الانعكاس
Coefficient of diffraction	معامل الانكسار
Communication	اتصال
Compatible	متجانس
Computation	حساب
Complex	عقدي
Conductance	ناقلية
Condition	شرط
Conductivity	الناقلية النوعية
Conductor	ناقل
Conjugate impedance match	توافق الممانعات
Connector	ناقل
Constant	ثابت
Control	تحكم
Current	تيار
Curve	منحني

D

Deform	يشوه
Deformation	تشويه
Density	كثافة
Derivative	مشتق

Dielectric	العازل الكهربائي
Diffraction	انكسار
Dipole	هوائي ديبول
Direct	مباشر
Direction	اتجاه
Directional	اتجاهي
Directivity	توجيهي
Displacement	الانزياح
Dynamic	ديناميكي

E

Effect	تأثير
Effective	فعال
Electric	كهربائي
Electric field	الحقل الكهربائي
Electromagnetic	كهرطيسي
Electromagnetism	الكهرطيسية
Electromotive	القوة المحركة الكهربائية
Elliptic	قطع ناقص
Empirical	تجريبي
Energy	قدرة
Equation	معادلة

F

Factor	عامل
Fading	خفوت
Far	بعيد

Far field	الحقل البعيد
Field	حقل
Frequency	تردد
Function	تابع أو دالة

G

Gain	ربح
Group	مجموعة

H

Half wave	نصف طول الموجة
Horizontal	أفقي

I

Impedance	ممانعة
Incident wave	الموجة الواردة
Indirect	غير مباشر
Inductance	تحريض
Instantaneous	لحظي
Integral	تكامل- صحيح
Ionization	التأين
Ionosphere	الجو المتأين
Isotrope	نظري نقطي

L

Layer	طبقة
Line	خط
Linear	مستقيم-خطي

M

Matching circuit	دارة توافق
Maximum	الحد الأقصى
Medium	وسط-متوسط
Micro	ميكروي
Minimum	الحد الأدنى
Minus	سالب
Mode	نمط

N

Near	قريب
Noise	ضجيج
Noise factor	عامل الضجيج

O

Obstacle	حاجز-عائق

P

Pattern	مخطط
Penetration	اختراق
Permeability	النفاذية
Permittivity	ثابت العازلية
Phase	طور
Phase constant	ثابت الطور
Phase velocity	سرعة الطور
Physics	الفيزياء
Plane	مستوي
Polarization	الاستقطاب

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University